

Grado en Ingeniería de Sistemas de
Comunicaciones

Curso académico 2018-2019

Trabajo Fin de Grado

Análisis de las Comunicaciones
mediante Luz Visible en el marco de
la Industria 4.0

Nuria Rodríguez Jiménez

Tutor: Máximo Morales Céspedes

Febrero – Marzo 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

*A ti papá,
por inspirarme.
Gracias.*

Agradecimientos

Tras cinco años y medio de duro trabajo, me gustaría agradecer a todas las personas que me han acompañado en esta etapa.

En primer lugar, a mi profesor y tutor, Máximo Morales, por su entrega en la enseñanza de las asignaturas impartidas, por atenderme tan bien en las tutorías, y por guiarme en este proyecto. Gracias por la paciencia y dedicación en cada reunión.

A mis compañeros de clase, porque al final “sí pudimos con la carrera”. Gracias por acompañarme y apoyarme, por esas divertidas tardes rodeados de prácticas y más prácticas, por los “descansitos” y por todas las cenas y celebraciones. Gracias Elena, Alex, Patri y Sandra. Sin vosotros no habría sido igual.

A mi pequeña familia, quienes me acompañan desde la infancia, mi gente, con quienes no importa el lugar de encuentro, sino la compañía, ya puede ser en la biblioteca, en algún mirador mientras atardece o de viaje a cualquier lugar. Gracias por el apoyo, por entenderme y, por intentar averiguar qué es el “formulote”. Gracias Irene, Laura, David, Raquel, Alicia, Nayla y Andreas.

A mi familia, por confiar en mí y por apoyarme en cada decisión tomada y, en especial, a ti mamá, por estar siempre al pie del cañón, lista para abordar cualquier situación. Esta etapa la hemos superado juntas, gracias por confiar ciegamente en mí.

A mi compañero de aventuras, Sandy, gracias, por no soltarme nunca. Por estar ahí, por acompañarme durante estos cinco largos años. Por ese desayuno en París, por ese paseo en barco por los canales de Ámsterdam, por esas caminatas en Bruselas y, por todas las escapadas, tan necesarias, después de exámenes. Por creer en mí, en mis sueños e impulsarme a conseguirlos. Por esa magia que desprendes y por transmitirme tanta paz. Gracias bizcocho, por cerrar esta etapa a mi lado.

Resumen

En la actualidad, el aumento de dispositivos móviles con conectividad a Internet y el auge del *Internet of Things* (IoT), están impulsando una demanda continua de capacidad de transmisión de datos inalámbrica. Debido a este crecimiento, el espectro radioeléctrico disponible resulta insuficiente. Por ello, tanto el estándar 5G como WiFi en 60 GHz (mmWaves) o 600 GHz (LiFi) proponen explotar nuevas bandas de frecuencia no reguladas, como la luz visible.

En este contexto, el sector de la construcción es el menos digitalizado. Su transformación será impulsada por un conjunto de avances dando lugar a la cuarta revolución industrial, Industria 4.0. En este proyecto, hemos propuesto la tecnología VLC para ofrecer conectividad dentro del marco de la Industria 4.0, concretamente durante la construcción de un túnel. Evaluamos la viabilidad del modelo de sistema propuesto caracterizando el canal, en función de la distancia y la frecuencia, destacando la importancia del ángulo ROA, *Receiver Orientation Angle*, para aumentar las posibilidades de transmisión. Hemos propuesto un receptor piramidal, donde cada cara corresponde a un fotodiodo.

Los resultados nos muestran la importancia del ángulo ROA para poder establecer un enlace fiable. En relación con la tasa *Symbol Error Rate* (SER), para frecuencias de 1 MHz, la componente LOS puede suponer un impedimento, el cual no garantiza un enlace fiable. Este hecho se compensa con la aportación de la componente NLOS, especialmente en entornos confinados como los túneles. Sin embargo, para frecuencias de modulación altas, la componente NLOS se atenúa, pudiendo ocasionar pérdidas de potencia considerables. Los resultados demuestran que, transmitiendo a 1 MHz, garantizamos una velocidad de al menos 1 Mbit/s con una probabilidad de error satisfactoria.

ÍNDICE

<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	14
<u>1.1. Estado de las comunicaciones</u>	14
<u>1.2. Industria 4.0 y construcción</u>	15
<u>1.3. Internet of Things en Industria 4.0</u>	16
<u>1.4. Comunicaciones tradicionales basadas en RF</u>	17
<u>1.4.1. Ancho de banda</u>	18
<u>1.4.1. A. Comunicaciones Celulares</u>	18
<u>1.4.1. B. Comunicaciones en ondas milimétricas (mmWaves)</u>	19
<u>1.4.2. Falta de conectividad en entornos hostiles o rurales</u>	19
<u>1.4.3. Importancia de la latencia en Industria</u>	20
<u>1.5. Comunicaciones mediante Luz Visible (VLC)</u>	21
<u>1.5.1. Características</u>	21
<u>1.5.2. Ventajas VLC frente a RF</u>	23
<u>1.5.3. Marco regulador. Estado de los estándares VLC</u>	24
<u>1.6. Estado socio-económico. Industria 4.0</u>	26
<u>1.7. Objetivos del proyecto</u>	27
<u>2. ESTADO DEL ARTE</u>	28
<u>3. SISTEMA ÓPTICO</u>	29
<u>3.1. Modelo del sistema</u>	29
<u>3.1.1. Modulaciones disponibles</u>	31
<u>3.1.1. A. Modulaciones disponibles mono-portadora</u>	31
– <u>On-Off Keying (OOK)</u>	31
– <u>Pulse Width Modulation (PWM)</u>	32
– <u>Pulse Position Modulation (PPM)</u>	33
– <u>Pulse Amplitude Modulation (PAM)</u>	34
<u>3.1.1. B. Modulaciones disponibles multi-portadora</u>	34
<u>3.1.1. C. Pulse Amplitude Modulation (PAM)</u>	35
<u>3.2. Transmisor con M-PAM</u>	37
<u>3.3. Canal óptico</u>	37
– <u>Componente Line-of-Sight (LoS)</u>	38
– <u>Componente Non Line-of-Sight (NLoS)</u>	39

3.4. Receptor	39
<u>4. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL ÓPTICO EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES</u>	41
4.1. Especificaciones del problema	42
4.2. Caracterización del canal	42
4.2.1. Caracterización del canal LoS	43
4.2.1. A. Caracterización del canal LoS en función de la distancia	44
4.2.1. B. Caracterización del canal LoS en función de la frecuencia	58
4.2.2. Caracterización del canal NLoS	64
4.2.2. A. Caracterización del canal NLoS en función de la frecuencia	65
<u>5. SIMULACIONES</u>	66
5.A. Usuario fijo	66
5.B. Usuario aleatorio	85
<u>6. CONCLUSIONES</u>	104
6.1. Aplicaciones de cara al futuro	105
<u>7. REFERENCIAS</u>	107
 <u>ANEXO I – PRESUPUESTO</u>	 112
<u>ANEXO II – ABSTRACT</u>	113
<u>1. INTRODUCTION</u>	113
1.1. State of communications	113
1.2. Industry 4.0 and construction	113
1.3. <i>Internet of Things</i> at Industry 4.0	113
1.4. Traditionally communications based on radiofrequency	113
1.4.1. Bandwidth	114
1.4.1. A. Cellular Communications	114
1.4.1. B. Millimeter Waves Communications	114
1.4.2. Lack of connectivity in hostile or rural environments	114
1.5. Visible Light Communications (VLC)	114
1.5.1. Characteristics	114
1.5.2. Advantages VLC vs. RF	115

<u>1.5.3. Regulatory environment</u>	115
<u>1.6. Applicaton in Industry 4.0</u>	115
<u>1.7. Objectives of the project</u>	115
<u>2. THE STATE OF ART</u>	115
<u>3. OPTICAL SYSTEM</u>	116
<u>3.1. System Model</u>	116
<u>3.1.1. Available modulations</u>	116
<u>3.1.1. A. Mono-carrier modulations available</u>	116
<u>3.1.1. B. Multi-carrier modulations available</u>	116
<u>3.1.1. C. Pulse Amplitude Modulations</u>	
<u>3.2. Transmitter with M-PAM</u>	116
<u>3.3. Optical channel</u>	117
<u>3.4. Receptor</u>	117
<u>4. CHARACTERIZATION OF THE OPTICAL CHANNEL IN TUNNELS CONSTRUCTION</u>	118
<u>4.1. Channel characterization</u>	118
<u>4.1.1. LoS cannal characterization</u>	118
<u>4.1.1. A. LoS channel depending on the distance</u>	118
<u>4.1.1. B. LoS channel depending on the frequency</u>	119
<u>4.1.2. NLoS chananel characterization</u>	119
<u>4.1.2. A. NLoS cannal characterization depending on the frequency</u>	120
<u>5. SIMULATIONS</u>	120
<u>5.A. Fixed user</u>	120
<u>5.B. Random user</u>	
<u>6. CONCLUSIONS</u>	123

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<u>Gráfica 4.1.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 0^\circ]$</u>	46
<u>Gráfica 4.2.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$</u>	47
<u>Gráfica 4.3.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 60^\circ]$</u>	48
<u>Gráfica 4.4.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$</u>	49

<u>Gráfica 4.5.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$</u>	50
<u>Gráfica 4.6.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$</u>	51
<u>Gráfica 4.7.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$</u>	52
<u>Gráfica 4.8.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$</u>	53
<u>Gráfica 4.9.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$</u>	54
<u>Gráfica 4.10.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$</u>	55
<u>Gráfica 4.11.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [225^\circ, 60^\circ]$</u>	56
<u>Gráfica 4.12.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$</u>	57
<u>Gráfica 4.13.</u>	<u>Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [315^\circ, 60^\circ]$</u>	58
<u>Gráfica 4.14.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [0^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$</u>	59
<u>Gráfica 4.15.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [45^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	60
<u>Gráfica 4.16.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [135^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	61
<u>Gráfica 4.17.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [180^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	62
<u>Gráfica 4.18.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [225^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	63
<u>Gráfica 4.19.</u>	<u>Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [315^\circ, \theta]$ donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	63
<u>Gráfica 4.20.</u>	<u>Canal NLoS en función de la frecuencia. $RA = [0^\circ, 30^\circ,]$</u>	65
<u>Gráfica 5. A.1.</u>	<u>$\alpha = 0^\circ, \theta = 0^\circ$. Canal LoS</u>	63
<u>Gráfica 5. A.2.</u>	<u>$\alpha = 0^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	69
<u>Gráfica 5. A.3.</u>	<u>$\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	70
<u>Gráfica 5. A.4.</u>	<u>$\alpha = 45^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	71
<u>Gráfica 5. A.5.</u>	<u>$\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	72
<u>Gráfica 5. A.6.</u>	<u>$\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	73
<u>Gráfica 5. A.7.</u>	<u>$\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	74
<u>Gráfica 5. A.8.</u>	<u>$\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	75
<u>Gráfica 5. A.9.</u>	<u>$\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	76
<u>Gráfica 5. A.10.</u>	<u>$\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	77

<u>Gráfica 5. A.11. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	78
<u>Gráfica 5. A.12. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	79
<u>Gráfica 5. A.13. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	80
<u>Gráfica 5. A.14. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	81
<u>Gráfica 5. A.15. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	82
<u>Gráfica 5. A.16. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	83
<u>Gráfica 5. A.17. $\alpha = 315^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	84
<u>Gráfica 5. A.18. $\alpha = 315^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	85
<u>Gráfica 5. B.1. $\alpha = 0^\circ, \theta = 0^\circ$. Canal LoS</u>	87
<u>Gráfica 5. B.2. $\alpha = 0^\circ, \theta = 0^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	88
<u>Gráfica 5. B.3. $\alpha = 0^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	89
<u>Gráfica 5. B.4. $\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	90
<u>Gráfica 5. B.5. $\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	91
<u>Gráfica 5. B.6. $\alpha = 45^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	92
<u>Gráfica 5. B.7. $\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	93
<u>Gráfica 5. B.8. $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	94
<u>Gráfica 5. B.9. $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	95
<u>Gráfica 5. B.10. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	96
<u>Gráfica 5. B.11. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	96
<u>Gráfica 5. B.12. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	97
<u>Gráfica 5. B.13. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	98
<u>Gráfica 5. B.14. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	99
<u>Gráfica 5. B.15. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	100
<u>Gráfica 5. B.16. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	101
<u>Gráfica 5. B.17. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	101
<u>Gráfica 5. B.18. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	102
<u>Gráfica 5. B.19. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS</u>	102
<u>Gráfica 5. B.20. $\alpha = 315^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS</u>	103
<u>Gráfica 5. B.21. $\alpha = 315^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS</u>	104
<u>Gráfica R.1. LoS channel depending on the distance $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$</u>	119

<u>Gráfica R.2.</u>	<u>LoS channel depending on the frequency $R0 = [45^\circ, \theta]$ where $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$</u>	119
<u>Gráfica R.3.</u>	<u>$\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. LoS Component</u>	121
<u>Gráfica R.4.</u>	<u>$\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. LoS and NLoS Component</u>	121
<u>Gráfica R.5.</u>	<u>$\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. LoS Component</u>	122
<u>Gráfica R.6.</u>	<u>$\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. LoS and NLoS Component</u>	123

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1.1.</u>	<u>Disponibilidad espectro radioeléctrico</u>	13
<u>Figura 3.1.</u>	<u>Potencia óptica que proporciona cada LED</u>	30
<u>Figura 3.2.</u>	<u>Modulación OOK</u>	32
<u>Figura 3.3.</u>	<u>Modulación PWM</u>	32
<u>Figura 3.4.</u>	<u>Ejemplo <i>Pulse Width Modulation</i></u>	33
<u>Figura 3.5.</u>	<u>Ejemplo <i>Pulse Position Modulation</i></u>	33
<u>Figura 3.6.</u>	<u>Diagrama de bloques de una modulación PAM</u>	35
<u>Figura 3.7.</u>	<u>Eficiencia espectral. Conforme aumenta la modulación, la probabilidad de error aumenta</u>	36
<u>Figura 3.8.</u>	<u>Geometría del entorno considerado que corresponde con los ángulos de radiación e incidencia del par transmisor-fotodiodo</u>	38
<u>Figura 3.9.</u>	<u>Vector de orientación del fotodiodo n del usuario k determinado por su ángulo azimutal y polar</u>	40
<u>Figura 4.1.</u>	<u>Dimensión del túnel vista 3D.</u>	41
<u>Figura 4.2.</u>	<u>Vista 2D de la geometría del túnel</u>	42
<u>Figura 4.3.</u>	<u>Orientación del transmisor y receptor</u>	43
<u>Figura 4.4.</u>	<u>Orientación del transmisor LED</u>	43
<u>Figura 4.5.</u>	<u>Evolución del ángulo de radiación a medida que el usuario avanza en dirección x^+</u>	46
<u>Figura 4.6.</u>	<u>Escenario en 2D</u>	64
<u>Figura 4.7.</u>	<u>Recorrido componente NLoS</u>	64
<u>Figura 4.8.</u>	<u>Respuesta en frecuencia de la componente NLoS</u>	65
<u>Figura 5.1.</u>	<u>Orientaciones del receptor</u>	67
<u>Figura R.1.</u>	<u>As modulation increases, the probability of error increases</u>	117

<u>Figura R.2.</u>	<u>Receiver orientations</u>	118
<u>Figura R.3.</u>	<u>NLOS's Path</u>	119
<u>Figura R.4.</u>	<u>Frequency response of the NLOS component</u>	120

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1.1.</u>	<u>Objetivos Industria 4.0</u>	23
<u>Tabla 1.2.</u>	<u>RF frente VLC</u>	24
<u>Tabla 4.1.</u>	<u>Parámetros VLC</u>	42
<u>Tabla I.</u>	<u>Costes de personal</u>	112
<u>Tabla II.</u>	<u>Costes de material</u>	112
<u>Tabla III.</u>	<u>Costes generales</u>	112
<u>Tabla IV.</u>	<u>Presupuesto total</u>	112
<u>Tabla R.1.</u>	<u>Advantages VLC vs. RF</u>	115

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado de las comunicaciones.

En la actualidad, el número de dispositivos con capacidad multimedia, los dispositivos móviles con conectividad a Internet y el auge del conocido Internet de las cosas *Internet of Things*, (IoT) están impulsando una demanda continua de capacidad de transmisión de datos inalámbrica. Además, la visualización en streaming de videos HD y el acceso a servicios basados en la nube son las principales actividades que los usuarios realizan, en la actualidad y en un futuro próximo, requiriendo un gran volumen de datos. Esta demanda involucra una evolución de las redes e infraestructuras de comunicaciones con el objetivo de satisfacer las necesidades de las nuevas y futuras aplicaciones [1].

Debido a este crecimiento, el espectro radioeléctrico disponible por debajo de los 10 GHz resulta insuficiente. Esto se debe a las limitaciones de ancho de banda, ya que es finito y escaso. En radiofrecuencia se abastecen tanto comunicaciones celulares, como marítimas, satelitales, militares, etc. Por tanto, tan solo una fracción del ancho de banda disponible se reserva para las comunicaciones celulares, donde típicamente se utilizan esquemas ortogonales, es decir, dividiendo el espectro en pequeñas secciones, o pequeños anchos de banda, con el fin de evitar interferencia entre las bandas de frecuencia. A su vez se aplican soluciones como reutilización de frecuencia y reducción del tamaño de celda con el fin de maximizar el uso del espectro disponible. Por ejemplo, las conocidas como femtoceldas. Actualmente el precio medio del MHz ronda entre los 2 y 4 millones de euros. Además, es necesario destacar que el valor de las licencias de uso del espectro radioeléctrico para la prestación de servicios 5G ha alcanzado los 300 millones de euros, debido a las ofertas presentadas por los cuatro operadores que participaron en la subasta. Esto supone un coste tres veces mayor al precio de salida [2].

En este contexto, el estándar 5G propone explotar nueva bandas de frecuencia. Se plantea transmitir sobre ondas milimétricas, dentro del rango de 10 – 100 GHz, donde existe una gran cantidad de ancho de banda disponible o sobre bandas no reguladas, como la luz visible.

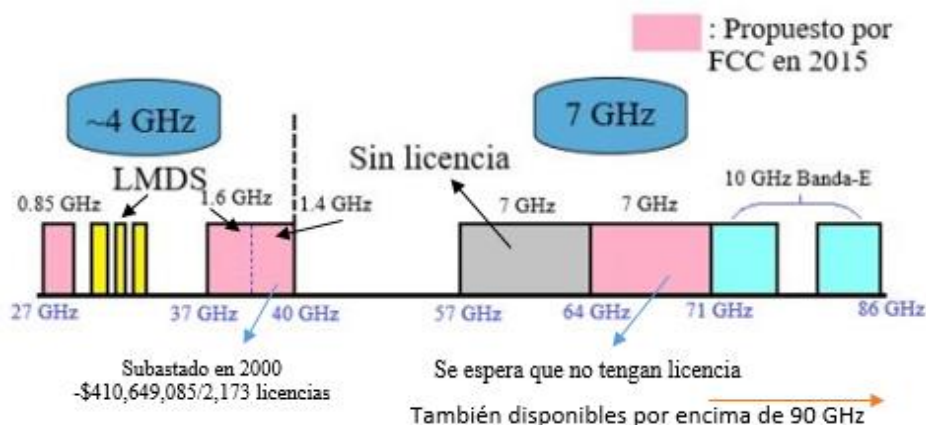


Figura 1.1. Disponibilidad espectro radioeléctrico

No obstante, trabajar con ondas milimétricas supone enfrentarse a nuevos problemas en las comunicaciones celulares como las pérdidas producidas por las altas frecuencias, por las pérdidas atmosféricas o por la presencia de obstáculos.

1.2. Industria 4.0 y construcción

Hasta ahora, el mundo que habitamos ha experimentado tres revoluciones industriales. En el siglo XVIII se originó la conocida primera Revolución Industrial, donde se llevó a cabo una de las más importantes transformaciones socio-económicas y tecnológicas experimentadas por el hombre. Fue a causa de la introducción de la mecanización de los procesos de producción junto con la máquina de vapor. La provisión de energía eléctrica y la producción en masa, aumentando así las líneas de producción, supuso otro de los grandes avances dentro del mundo de la economía y la tecnología dando lugar a la segunda revolución industrial. La entrada de los robots y la automatización dentro del proceso productivo originó la tercera revolución.

Hoy en día se prevé que la cuarta revolución industrial, denominada Industria 4.0, ocurrirá durante la próxima década. Dicho término surgió en Alemania en 2011 para nombrar al conjunto de tecnologías y procesos de producción que diseñarán la industria del futuro. Se centra en los sistemas de fabricación habitualmente conocidos en Estados Unidos como Internet Industrial de las cosas, *Industrial Internet of Things*, (IIoT). En ambos casos, la unión de las herramientas de producción a una red de comunicaciones, conocida como un sistema ciber-físico, *Cyber-Physical System*, (CPS), juega un papel fundamental en esta nueva generación de fabricación industrial [3].

Se calcula que los CPS basados en las comunicaciones inalámbricas permitirán una monitorización de las plantas y procesos de producción, dinamizando las fábricas estáticas centradas en un solo objetivo, convirtiéndolas en fábricas flexibles con la capacidad de producir una gran diversidad de bienes, adaptándose a las necesidades individuales de los clientes. Dicha transformación supone exigentes requisitos como reducir la latencia, elevar la fiabilidad y seguridad mediante cifrado, con el fin de no desviarse del objetivo principal de la producción. Esto supone nuevos retos para las redes inalámbricas donde, hasta ahora, principalmente se han estudiado en las comunicaciones inalámbricas basadas en RF [3].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, si se habla de la cuarta revolución industrial, nos esperamos una industria inteligente, conectada y controlada a través de Internet, donde la transmisión de información está sujeta a estándares de seguridad muy restrictivos. También contamos con la complejidad de transmitir datos en entornos con un elevado número de dispositivos, lo cual, generan interferencia. Además, uno de los requisitos imprescindibles en un entorno industrial es una iluminación óptima.

Sin embargo, es necesario aplicar importantes cambios para conseguir tales innovaciones. En la actualidad, los entornos industriales dispones de una línea de potencia eléctrica, es decir, un cableado sencillo capaz de aportar potencial eléctrico. Suelen encontrarse en entornos aislados, donde no es viable un sistema de comunicaciones basado en radiofrecuencia y a su vez la luz solar es inexistente [2]. En concreto, este trabajo está orientado a las comunicaciones y aplicaciones para el sector de la construcción en el marco de la industria 4.0.

Según la noticia “*La construcción es el sector menos digitalizado en España*” publicado en *El Periódico*, el pasado 22 de mayo del 2017, “*El sector de la construcción es el que menos invierte en innovación*”. El gasto de las empresas españolas en invocación del

sector de la construcción tan solo supuso un 1,1%, mientras que dicho sector aporta el 10,4% del producto interior bruto (PIB). El informe BBConstrumat, elaborado tras la 20ª edición de Barcelona Bulding Construmat, destaca que a dicho sector se le presenta la oportunidad, y reto, de “*abandonar su zona de confort*” [4].

Un estudio de la consultora estratégica *Mckinsey* (“*The digital future of Construction*”) destaca que la digitalización de la construcción se encuentra por detrás de sectores como la agricultura, por ello la innovación es una de sus tareas pendientes más relevantes. Dicho informe señala que el nivel de productividad del sector es el mismo que el de 80 años atrás –“*La digitalización, la innovación y la apuesta por la sostenibilidad serán las claves del futuro*” [4].

El informe, elaborado por el ITeC, destaca la desigualdad que empieza a experimentar dicho sector: “*no es igual en todas las comunidades autónomas y mucho menos en los subsectores*”, ya que la vivienda ha sido el primer mercado en recuperarse tras dos años de crecimiento. Mientras, la edificación no residencial se encuentra en fase de estancamiento [4].

En la noticia “*La construcción empieza a abrazar las tecnologías del siglo XXI*”, publicada en *EL PAÍS*, se corrobora que “*la robótica, la fabricación digital o la impresión 3D se abren paso lentamente en un sector que parece reñido con la innovación*”. Ione Ruete, directora de la feria internacional BB Construmat, señala: “*Si queremos ver grandes beneficios, no podemos utilizar los avances de forma aislada, sino combinarlos para agilizar la ejecución de proyectos más industrializados, seguros, eficientes y sostenibles*” [5].

Considera que sólo de esta manera cambiará radicalmente la concepción tradicional del proceso constructivo, dejando de ser lineal para transformarse en un ciclo de trabajo, dando como resultado mayor coordinación y colaboración de los agentes implicados. Para Ruete, esta colaboración sintetiza la filosofía *Building Information Modeling* (BIM), tipo de software que está impulsando la digitalización de la construcción, facilitando la entrada de tecnologías innovadoras como drones, realidad aumentada, impresión 3D o IoT. El vocal primero de la Junta de Gobierno del COAM – Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid- César Ruiz-Larrea, opina lo mismo que Ione si le preguntamos por la situación del sector destacando que: “*el BIM está marcando la diferencia respecto al modelo anterior. Ahora todos los técnicos implicados podremos trabajar sobre un mismo archivo e ir definiendo el modelo hasta, si se necesita, el detalle 1/1*” [5].

La transformación del sector será impulsada por un conjunto integrado de avances dando lugar a la cuarta revolución industrial, Industria 4.0. Mikel Barrado, gestor de mercado de Construcción Sostenible en Tecnia, señala las futuras incorporaciones de distintas herramientas a cada una de las fases del ciclo de vida de los edificios, ciudades e infraestructuras. De esta manera *cloud computing* respaldará la etapa del diseño, modelado virtual de forma colaborativa online, simulación y optimización automática de los bocetos. Tecnologías como la fabricación aditiva o impresión 3D, la robótica colaborativa, los drones, el láser 3D o las simulaciones multidimensionales, entre otros, se incorporarán en la fase de fabricación y construcción. En la última etapa, operación y mantenimiento, se utilizará como respaldo IoT, *big data*, *data mining*, redes neuroales y

el *Deep learning*, la realidad aumentada, simulación online, ciber-seguridad o el *blockchain* [5].

En línea con lo expuesto anteriormente, la robótica, la fabricación digital o la impresión en 3D agilizarán la construcción, disminuyendo el coste y el consumo de recursos. Mariola Rodríguez, gestora de proyectos de industria y Transporte en TecNALIA, asegura que *“Es necesario adaptarse y aportar a la sociedad las necesidades que se crearán en cuanto a fabricación de robots, programación, mantenimiento o seguridad, porque esta nueva forma de fabricar es la que garantizará la productividad y eficiencia de las plantas y, por tanto, su éxito y supervivencia en el medio y largo plazo”* [5].

En este contexto, VLC se posiciona como una de las tecnologías más apropiada para dar soporte al nuevo concepto IoT, ya que fomenta la optimización y mejora los procesos productivos aumentando el nivel de competitividad de las empresas.

1.3. Internet of Things en Industria 4.0

Internet of Things se ha convertido en un componente imprescindible en los informes relacionados con las tecnologías de la información. Dentro de *Internet of Things*, cada dispositivo individual tiene asociado una URL por la cual se puede acceder a él mediante Internet e interactuar con los sistemas de información conectados.

Es necesario distinguir bien los términos IoT e IIoT. Para el primer caso, *Internet of Things* está relacionado con los consumidores, es decir, aplicados en electrodomésticos, en la electrónica del entretenimiento, automóviles, ordenadores y otros muchos elementos que utilizamos en la vida cotidiana. Por otro lado, *Industrial Internet of Things*, (IIoT), o Industria 4.0 se refiere a fábricas, maquinaria, instalaciones de producción o redes de sensores [6].

En un informe reciente, Cisco estipula que para el año 2020, habrá alrededor de 50 mil millones de dispositivos conectados a Internet, a pesar de encontrarse más del 99% de las cosas del mundo físico sin conectividad a Internet. No obstante, la interconexión mediante Internet del elevado número de personas, procesos, datos y cosas, será cada vez más importante en los últimos años. Este rápido crecimiento ofrece inmensas oportunidades para empresa y sectores industriales [6]. En este entorno, según los expertos, la incorporación de soluciones IoT *“cumplen con un doble objetivo, el de hacer la producción más eficiente y competitiva y, en paralelo, el que los trabajadores adquieran mayores niveles de seguridad y desarrollen perfiles profesionales de mayor valor añadido”* [7].

Es necesario destacar que un reciente estudio indica que el 74% de los líderes mundiales pertenecientes a este sector reconocen que sus planes de expansión y desarrollo, que se aplicarán durante los próximos 5 años, estarán basados en el concepto de Industria 4.0. Es más, de ellos, el 93% de los responsables industriales confirma que el mantenimiento predictivo con equipos de monitorización en tiempo real es una herramienta indispensable para la planificación de las fábricas. En el 2030 se estima, según los expertos, que la industria 4.0 será una realidad irrefutable en todas las fábricas del mundo, dando por completado el periodo de revolución digital, el cual ha comenzado en el 2017 y se consolidará a partir del 2020 [8].

Según el informe *'Things Matter'* presentado por Telefónica, IPSOS y Accenture el pasado 2017, con el fin de conocer las áreas donde se realizará una aplicación directa de IoT dentro del sector industrial es necesario valorar los siguientes aspectos [7]:

- *Automatización de procesos*

Gracias a la aparición de IoT, las herramientas son capaces de ocuparse de ellas mismas y liberar tiempo a los trabajadores. Este cambio es un factor de eliminación de fronteras entre las distintas industrias (medicina digital, agricultura de precisión, fabricación inteligente, etc.)

- *Gestión y optimización de flotas*

La gestión de flotas comerciales integradas por coches conectados encuentra en las aplicaciones IoT soluciones sencillas para el mantenimiento preventivo y para anticipar las alertas de reparaciones, recibir avisos en tiempo real sobre el estado del vehículo, entre otros. Además, permite la integración con sistemas para la gestión de clientes, facilitando una mejor atención personalizada y agilizando trámites.

- *Seguimiento de mercancías*

La tecnología IoT proporciona al trabajador información en tiempo real, como la localización de los productos y las variaciones de su estado.

- *Control de stock en tiempo real*

El tedioso control del inventario ha sido, hasta ahora, una tarea de conteo manual expuesto a constantes fallos. Optimizar dicha tarea y conocer su situación en tiempo real mejora la gestión de los productos y la atención a los clientes. Los sistemas de identificación por radiofrecuencia o RFID (*Radio Frequency Identification*) se basan en una tecnología que permite detectar objetos a distancia sin necesidad de contacto. Gracias al uso cada vez más extendido de las etiquetas RFID se minimiza el tiempo dedicado a las tareas de conteo manual. Así se agiliza la medición cuantitativa y cualitativa del stock, para ajustar los pedidos a las necesidades reales de cada punto de venta.

- *Drones*

La aplicación de IoT en los drones facilita la monitorización de instalaciones de gran extensión, reduciendo los desplazamientos de los trabajadores en momentos puntuales (incidencias y mantenimientos). Otro uso de drones con IoT son la gestión de redes de abastecimiento, control de cultivos y granjas, y la seguridad en playas, montañas e incluso control de carreteras.

Los avances mencionados anteriormente serán posibles gracias a la aplicación del Internet of Things, ya que no será posible una revolución industrial sin aplicar su tecnología “inteligente”. Es la base para una mayor personalización del producto y una mayor flexibilidad, además permite un mayor impacto de los procesos automatizados en los proveedores y consumidores. Así, la industria 4.0 se establece como el nuevo estándar de fabricación en el futuro [9].

1.4. Comunicaciones tradicionales basadas en RF

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, la Industria 4.0 se posiciona como el pilar de la tecnología “inteligente”. A su vez, respecto a la tecnología radio-frecuente, dicha “inteligencia industrial” se considera como una posible solución a los problemas que pueden surgir en un sistema de comunicaciones vía radio, sobre todo si se encuentra

en un entorno industrial ya que, existen varios factores que empeoran la transmisión o recepción de una comunicación.

1.4.1. Ancho de banda

1.4.1. A. Comunicaciones Celulares

El espectro radioeléctrico es el medio físico mediante el cual se transmiten las ondas electromagnéticas (OEM) que hacen posibles las telecomunicaciones [19].

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), en España, es un elemento clave para definir la atribución o el uso de cada una de las bandas de frecuencia en las que se divide la cantidad de espectro disponible para radiocomunicaciones. Este documento se publicó en 1990 y se actualiza constantemente con el fin de reflejar todos los cambios y novedades [15].

Formalmente y según la UIT el rango de frecuencias que comprende el espectro radioeléctrico se encuentra entre 0 Hz – 3000 GHz. En la práctica, el rango teórico está limitado. Por debajo de 9 KHz las frecuencias tienen baja capacidad para transportar información. Además, entre ellas se producen notables interferencias, por lo que no se suele trabajar con ellas. Por otro lado, las frecuencias más altas del espectro están poco investigadas, ya que hasta ahora la tecnología comercial disponible no es capaz de utilizarlas de forma efectiva.

Por lo tanto, en la práctica, el espectro radioeléctrico se encuentra entre las frecuencias entre 30 KHz – 300 GHz [19], donde cada una será asignada a una tecnología diferente. Nos centraremos en el estudio del ancho de banda de los estándares celulares actuales 4G y 5G.

En primer lugar, en cuanto al 4G-LTE (que se encuentra la banda inferior a 4 GHz) al igual que para las conexiones 3G, se debe tener en cuenta que la capacidad de ancho de banda es compartida por todos los usuarios que se encuentran conectados en el mismo instante temporal a una misma estación base, y a su vez, la calidad de la conexión de cada usuario depende de la distancia de separación con la estación base y de las interferencias existentes.

Uno de los principales problemas de dicha tecnología es que no tiene la capacidad suficiente para proporcionar todos los datos necesarios a un creciente número de dispositivos móviles. Por esta razón se plantea el estándar 5G, con el que se abrirán las puertas a nuevos usos como la utilización de sensores inalámbricos, semáforos inteligentes, comunicación de coche a coche, etc. [16].

Sin embargo, en muchos lugares, donde se incluye a Europa, la cobertura 4G no abarca el 100% de la superficie. Incluso, en algunos países africanos apenas está implantado. A estos retos se enfrentan los operadores, donde desembolsarán una importante inversión y la prevista para la red 5G lo será más aún [17].

Debido a la evolución de los sistemas de comunicaciones celulares y motivados por una necesidad de cumplir unas condiciones de Calidad de Servicio, (*Quality of Service*, QoS), cobertura y capacidad, se ha planteado una nueva idea de red denominada Redes Heterogéneas, (*Heterogeneous Networks*, HetNet), contemplando la introducción de

pequeñas celdas donde, según la cantidad de celdas que se introduzcan en la red móvil, se incrementa la cobertura, la capacidad y la calidad de la red dependiendo, a su vez, del nivel de interferencia presente en el sistema.

No obstante, la interferencia generada por las estaciones base de distintas tecnologías limitan la cobertura, la capacidad y la calidad del servicio que se puede llegar a alcanzar idealmente en la red. Por este motivo, la interferencia se convierte en un factor crítico de la red heterogénea que se debe controlar [18].

1.4.1. B. Comunicaciones en ondas milimétricas (mmWaves)

Las redes de acceso inalámbricas han estado en desventaja respecto a las cableadas hasta que la norma IEEE 801.11ac sobrepasó los Gbps operando a 5GHz. A su vez, el ancho de banda disponible en esta frecuencia resulta limitado para soportar tantas aplicaciones de alto rendimiento junto con el elevado número de usuarios que existirán en los próximos años. Por este motivo se realizan investigaciones para explotar las ondas milimétricas, ya que cuentan con una gran cantidad de ancho de banda disponible; donde la banda de los 60 GHz es la precursora para las comunicaciones inalámbricas de la próxima generación [20].

En este contexto, es preciso mostrar que el estándar 5G trabaja con frecuencias extremadamente altas, las cuales se denominan ondas milimétricas, dentro del rango de 30 GHz -300 GHz. La mayoría de estas frecuencias funcionan sólo si se produce una línea de visión directa y clara entre el transmisor y el receptor de la señal [16]. Algunas de estas frecuencias son atenuadas por la humedad, lluvia y otros objetos. Por este motivo, con esta tecnología no es posible establecer largos enlaces de conexión [16].

Ocurre igual que con las ondas electromagnéticas, las ondas milimétricas pierden intensidad de radiación con el cuadrado de la distancia cuando viajan por el espacio libre. Sabiendo que $\lambda = c/f$, en [20] se prueba que cuanto mayor es la frecuencia, menor es la longitud de onda, por lo tanto a una frecuencia de 60 GHz, y $\lambda = 5$ mm, se obtienen 11 dB más de pérdidas en el espacio libre que en las bandas de comunicaciones utilizadas hasta el momento, dando como resultado unas pérdidas verdaderamente altas. Con esto se evidencia que las transmisiones en los exteriores y a largas distancias empleando este rango de frecuencias se complican.

Además, si se trabaja en la banda de 60 GHz hay que contar con variables adicionales que influyen en las pérdidas. Éstas son la absorción del vapor del agua y el oxígeno, presentes en la atmosfera, también conocidas como pérdidas atmosféricas. Además de obstáculos presentes en el ambiente ya sean paredes, que puede provocar una media de pérdidas de 10 dB, con presencia de adornos hasta 35 dB y las propias personas, evitando la penetración a través de estos [20].

1.4.2. Falta de conectividad en entornos hostiles o rurales

La Unión Europea ha marcado como objetivo conseguir que todos los ciudadanos europeos disfruten de una cobertura de banda ancha de más de 30 Mbps en 2020 [23]. Sin embargo, en los entornos rurales del territorio español, no es viable pensar en soluciones basadas en tecnologías cableadas que aseguren estos accesos, ya que se encuentran dispersos típicamente en entornos montañosos y poco poblados.

En la actualidad, las compañías no invierten en proveer a estos territorios de tecnologías como la fibra óptica. Debido a esto, las tecnologías inalámbricas están jugando un importante papel, ya que la infraestructura que se despliegue en los entornos rurales servirá como base para la futura implantación de la tecnología 5G.

Una de las iniciativas que se están llevando a cabo para proveer de conectividad a estas zonas son las conocidas Smart City, o ciudades inteligentes. Aunque estos territorios no disponen de acceso a la administración electrónica o a los nuevos servicios desarrollados dentro del marco de Smart City, debido al retraso respecto a las grandes ciudades en el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones (especialmente en el caso de la fibra óptica (FTTH) [28]), ejemplos como la localidad de Molinaseca, en la provincia de León, con menos de 1000 habitantes, ha implantado un sistema de gestión inteligente para algunos de sus servicios públicos característico de una ciudad inteligente [29]. Esta mejora forma parte del proyecto Territorio Rural Inteligente, desarrollado por la Junta de Castilla y León. Para la implantación cuenta con la tecnología inalámbrica Narrow Band IoT (NB IoT), entre otras. Este es un nuevo estándar industrial, que se basa en el bajo consumo energético, permitiendo así conectar toda clase de dispositivos con un gasto mínimo de batería. Además, ofrece una implementación rápida dentro de la red de los operadores.

Otro entorno que presenta problemas de conectividad, a la hora de establecer un sistema de comunicaciones basado en radiofrecuencia, es el industrial, siendo éste el entorno en el que se centra el presente proyecto. Primero, es necesario recordar, tal y como se ha mencionado anteriormente, que las ondas de radio pueden viajar a través de cualquier dieléctrico donde, dependiendo de la permitividad y la conductividad del material que atraviesen, pueden sufrir atenuaciones.

Si una onda electromagnética incide sobre un conductor perfecto, la densidad de potencia que transporta no atraviesa la superficie, sino que se refleja. Esto ocurre porque en un conductor perfecto la conductividad, representada por σ , es infinita. Por este motivo, el flujo de potencia se propaga a través de la superficie sin atravesar el interior, de ahí que en el interior el campo magnético sea nulo. Por esta razón, toda la densidad de potencia es reflejada. Esta característica de las ondas electromagnéticas dificulta la comunicación radio frecuente en entornos industriales, ya que es común la presencia de materiales conductores, como el metal, ya sea en la maquinaria, en paneles, mesas de trabajo, etc. En consecuencia, si se desea implantar un sistema de comunicaciones en una industria o factoría, es necesario contar con esta propiedad, ya que las ondas transmitidas no tendrán visión directa con su receptor, sufriendo así reflexiones en el trayecto provocando pérdidas en la conectividad.

1.4.3. Importancia de la latencia en la Industria

En la actualidad, teniendo en cuenta la evolución de las tecnologías de comunicaciones, conseguir alta velocidad de conexión no es el único requisito necesario para conseguir los resultados esperados, también es importante la latencia, es decir, el tiempo total que dura la recepción de un paquete. Por ejemplo, según explica Ken Hu, vicepresidente del consejo de Huawei, *“en una red 4G, un coche autónomo, que avance a una velocidad de 100 km/h, continuará moviéndose 1,4 metros desde que detecta un peligro, hasta que*

aplica los frenos. En una red 5G, el mismo automóvil, se moverá sólo 2,8 centímetros. Esto puede significar la diferencia entre la vida y la muerte” [26].

1.5. Comunicaciones mediante Luz Visible (VLC)

La comunicación mediante luz visible (VLC) está emergiendo vertiginosamente como una tecnología complementaria a la comunicación tradicional por radiofrecuencia y permite, a su vez, nuevos casos de uso de dispositivos inalámbricos que sólo se pueden lograr gracias a esta tecnología [10].

1.5.1 Características

Con el fin de conocer mejor esta novedosa tecnología vamos a detallar en este apartado sus principales características. La principal propiedad de la tecnología VLC es la capacidad de iluminar a la vez que se realiza la transmisión de datos. Esto es posible porque la fuente de transmisión empleada son luminarias basadas en tecnología LED. La tecnología LED ofrece la posibilidad de modular su amplitud trabajando con altas frecuencias, siendo esto suficiente para alcanzar velocidades significativas de datos sin perjudicar en ningún momento su función principal, iluminar. Esto es factible porque el ojo humano no puede percibir la modulación de la amplitud de la luz mientras la frecuencia de modulación se encuentre por encima del llamado umbral de fusión de parpadeo [10].

El umbral de fusión de parpadeo se define como la frecuencia a la que el observador humano no es capaz de apreciar estímulos de luz intermitente [32]. No superar dicho umbral es imprescindible para garantizar la seguridad del ojo humano, ya que, tal y como se explica en el artículo [33], el parpadeo puede convertirse en un peligro para la salud, provocando molestias oculares, dolores de cabeza, etc. Los sistemas VLC deben trabajar a una frecuencia de modulación superior al umbral para prevenir daños.

Las altas velocidades de transmisión de datos en VLC se consiguen mediante dicha modulación y, la técnica de comunicación de correlación es típicamente conocida como modulación de intensidad/detección directa (IM/DD). En el transmisor, se mantiene el nivel de iluminación deseado ajustando el sesgo de corriente continua (CC) apropiado. La antena del receptor está compuesta por un fotodiodo que transforma la potencia óptica recibida en una señal de corriente, donde a su vez, es amplificada por un amplificador de transimpedancia y alimenta a un procesador digital de banda base [10].

Típicamente, la tasa de transmisión del enlace VLC está limitada por el ancho de banda de modulación de los LEDs. Es importante tener en cuenta que, a causa de la relación entre el ancho de banda, la potencia de los LEDs y las varias impedancias parasitarias en su embalaje, las señales moduladas a altas frecuencias sufren fuertes atenuaciones [10].

Con un ancho de banda limitado es posible conseguir estas altas tasas de transmisión usando constelaciones de alto orden. Sin embargo, este tipo de modulaciones, espectralmente eficientes, necesitan una respuesta lineal de extremo a extremo. Para ello se requiere usar amplificadores de potencia lineales, pero, esta solución puede resultar contraproducente ya que los dispositivos LEDs “tienen hambre de energía”, contradiciendo así la ventaja principal de éstos: la eficiencia energética. Como solución

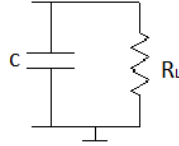
se pueden adaptar matrices de LEDs más pequeñas y menos potentes como bloques de construcción de dispositivos de iluminación [10].

Se ha demostrado en trabajos recientes que el ancho de banda de modulación de los LEDs a escala micrométrica puede superar los 300 MHz [11], [12]. Esto significa que las tasas de datos en cientos de Mbps pueden conseguirse utilizando una modulación binaria simple, sustituyendo así la necesidad de utilizar ineficientes amplificadores lineales [10].

Teniendo en cuenta que la arquitectura electrónica de un diodo es la siguiente:

Donde, la frecuencia a 3 dB es:

$$f_{3\text{ dB}} = \frac{1}{2\pi R_L C}$$



Se deduce que el máximo ancho de banda de estos micro-LEDs se consigue gracias a su baja capacitancia interna y a las bajas impedancias parasitarias. Otra forma de aumentar la velocidad de transmisión se consigue mediante la transmisión de flujos de datos independientes en LEDs de diferentes colores que se combinan para conseguir luz blanca, aprovechando así la característica de que cada color pertenece a una frecuencia distinta [10].

En cuanto al canal VLC no se ve afectado por la dispersión Doppler debido a que los patrones de interferencia destructiva y constructiva se producen en una escala de micras y son promediados de manera efectiva por el receptor del fotodiodo. Gracias a esta característica no se requieren sofisticados algoritmos para realizar un seguimiento del canal, ya que el canal es invariante en el tiempo, teniendo en cuenta que los apagones que pueden causar las sombras, pueden ser corregidos mediante una solicitud de repetición automática [10].

Como la respuesta en frecuencia del LED no es plana, los esquemas de modulación como el Multi-tono Discreto (DMT) son convenientes debido a que descomponen el canal en múltiples canales paralelos de frecuencia plana. Así mismo se puede utilizar la modulación de una única portadora haciendo uso de un ecualizador de canal del lado del receptor adecuado [10].

Por último, otra atractiva característica de la tecnología VLC es el bajo coste que implica su instalación y utilización. Como ya se ha mencionado anteriormente, los LEDs se utilizan como fuente de emisión, tanto de luz como de datos. Dichos dispositivos son muy baratos y, además, cumplen con el objetivo de consumir poca potencia. En este sentido, la tecnología LED se encuentra en un estado de madurez óptimo para la introducción de VLC.

Un grupo de trabajo del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), está tratando de normalizar las altas velocidades del VLC para la aplicación en la industria 4.0. La aplicación de dicha tecnología en el sector industrial puede resultar especialmente útil. La seguridad en este entorno es imprescindible, al tratarse de infraestructuras críticas.

A su vez, se propone en [35] el uso de Sistemas Cibernéticos (CPS, *Ciber Physical Systems*) para transformar las industrias. *Ciber Physical Systems* es una de las 5 principales tendencias tecnológicas clave que ofrecerá una interacción verdaderamente

intuitiva entre humanos y máquinas. El rendimiento de la comunicación, en cuanto a la latencia, ancho de banda y confiabilidad, afecta notablemente en las interacciones dinámicas entre los sistemas. El tiempo que conlleva realizar una tarea de control puede resultar crítico a la hora de habilitar un sistema con un correcto funcionamiento. En el futuro los CPS estarán presentes en la Industria 4.0. Gracias a dicha aplicación los entornos de producción serán auto-configurables, auto-ajustables y auto-optimizables, ofreciendo una mayor agilidad, flexibilidad y rentabilidad [35].

En resumen, los principales retos planteados para la Industria 4.0 son los siguientes:

OBJETIVOS INDUSTRIA 4.0
Reducir costes de producción
Minimizar coste de energía
Disminuir latencia
Flexibilidad en entornos hostiles
Aumentar el número de dispositivos
Disminuir consumo de recursos

Tabla 1.1. Objetivos Industria 4.0

1.5.2. Ventajas VLC frente a RF

La luz visible cuenta con ciertas ventajas frente a la radiofrecuencia tradicional como medio de comunicación.

En primer lugar, el espectro de luz visible no está regulado por ninguna licencia y actualmente su uso no está enfocado para las comunicaciones. Esta disponibilidad de espectro ofrece una gran oportunidad para las comunicaciones de banda ancha de bajo coste, aliviando así la evidente congestión del actual espectro en la banda industrial, científica y médica (en inglés, *Industrial, Scientific and Medical*, ISM) de 2.4 GHz [10].

En segundo lugar, debido a que la luz visible no penetra a través de las paredes de los edificios, VLC puede proporcionar un alto grado de reutilización espacial: Las señales VLC no interferirán entre sí en habitaciones adyacentes, reconociendo así una potente densidad espacial de velocidades de comunicación mucho mayor que la que se puede llegar a lograr con las señales de radiofrecuencia (RF). Por otro lado, esta propiedad de aislamiento de señal mejora la seguridad de las comunicaciones al evitar las escuchas de comunicaciones dentro de la habitación o del edificio [10].

Dado que las señales VLC, teniendo en cuenta la tecnología disponible en la actualidad, son un modo de comunicación incoherente (en relación con la portadora óptica), los componentes frontales de los transmisores y de los receptores son relativamente simples y de bajo coste que funcionan en banda base, sin necesidad de utilizar mezcladores de frecuencia o aplicar sofisticados algoritmos para la corrección de errores de RF tales como el ruido de fase [10].

Por otro lado, como la longitud de onda de la luz pertenece al orden de las sub-micras, si aplicamos arreglos a los fotodiodos podemos estimar con precisión la dirección de llegada. Tales arreglos pueden ser sensores de imagen, que ofrecen una geolocalización precisa de los dispositivos móviles en interiores [10].

La comunicación con luz visible presenta, por otro lado, ciertas debilidades en comparación con la comunicación RF tradicional. La principal desventaja es que la velocidad de transmisión de datos que se puede alcanzar disminuye considerablemente con el aumento de la distancia del enlace, por lo tanto, limita la variedad de casos de uso de VLC de alta velocidad de transmisión de datos [10].

Como se mencionó anteriormente, la comunicación mediante VLC es incoherente, dicha característica provoca que las pérdidas en el espacio libre son inversamente proporcionales a la distancia elevada a la potencia de cuatro, en comparación con las comunicaciones de RF, donde la potencia es elevada al cuadrado. Además, las velocidades de datos en el enlace VLC se degradan debido al ruido impulsivo si el receptor del fotodiodo se encuentra expuesto a rayos directos de luz solar [10].

Otra desventaja del VLC es la necesidad de tener encendida la luz para lograr transmitir datos a velocidades de enlace similares a las de WiFi, mientras que, para tasas bajas de datos, dentro del rango de kbps, las luces pueden atenuarse. Por consiguiente, el VLC no reemplazará a las comunicaciones en RF de alta velocidad, la cual siempre se utilizará en situaciones en las que se necesiten enlaces de largo alcance sin línea de vista y/o al aire libre. De hecho, es posible plantear una arquitectura de red WiFi integrando las comunicaciones VLC ya que son tecnologías complementarias y juntas pueden ofrecer ganancias netas para el rendimiento de la red inalámbrica [10].

En la siguiente tabla se mostrará un breve resumen de las diferencias más relevantes entre la tecnología de comunicación mediante luz visible y la tecnología basada en radiofrecuencia:

	RF	VLC
TASA DE DATOS	Alta	Muy alta
RANGO	9 KHz – 300 GHz	400 THz – 800 THz
FRECUENCIAS		
REGULACIÓN	Sí	No
RADIO COBERTURA	Orden de Km	Orden de m
COSTE	Elevado	Bajo
FUENTE DE RUIDO	Frecuencias adyacentes	Otras fuentes de iluminación
TRASPASO DE PAREDES	Sí	No
PÉRDIDAS ATMOSFÉRICAS	No	Sí
SEGURIDAD	Media-baja	Alta

Tabla 1.2. RF frente VLC

1.5.3. Marco regulador. Estado de los estándares VLC

El principal requisito para la adopción a gran escala de dicha tecnología es contar con disponibilidad de estándares. Dentro de este contexto, en IEEE 802.11 están trabajando para estandarizar VLC como otra capa física dentro del grupo de redes de área local inalámbricas IEEE 802.11, más conocido como WiFi. En la última actualización del proyecto IEEE 802.15 para las redes inalámbricas de área personal, presentada en el último trimestre del 2018, se especifica una nueva capa física (PHY) y modificaciones en

la norma IEEE 802.11 MAC que habilitan el funcionamiento de las comunicaciones inalámbricas ligeras (LC) [38].

Las mencionadas modificaciones consisten en [38]:

- Cambios en la capa física (*Physical layer*)
 1. Las operaciones sobre los enlaces ascendente y descendente se realizan en la banda de 380 nm a 5.000 nm
 2. La totalidad de modos de operación logran un rendimiento mínimo de 10 Mbps en un solo enlace, donde al menos, un modo de operación alcanza una tasa de 5 Gbps.
 3. Interoperabilidad entre distintas fuentes de luz de estado sólido con diferentes anchos de banda de modulación
- Cambios en la capa de acceso al medio (Media Access Control) de la norma IEEE 802.11 MAC [38]:
 1. Acceso a canales con función de coordinación híbrida (HCF)
 2. Detección y coexistencia de conjuntos de servicios básicos superpuestos (OBSS)
 3. Modos de funcionamiento de la gestión de energía existente (excluyendo nuevos modos), y modificaciones de otras cláusulas necesarias para apoyar estos cambios.

El objetivo de esta nueva norma es proporcionar conectividad inalámbrica para equipos fijos, portátiles y móviles estacionados dentro de un área local. Ofrece también a los organismos reguladores un medio para estandarizar acceso a una o más bandas de frecuencia a efectos de comunicación de área local [38].

Anterior a esto, ya existían una serie de estándares que se pueden aplicar a las tecnologías de comunicación de luz. El primer estándar IEEE 802.11 contenía un *Physical layer*, PHY, que se eliminó debido a la falta de empuje comercial. El segundo estándar IEEE para comunicaciones ligeras fue el IEEE 802.15.7 [13]. Dicho estándar se encuentra obsoleto por no considerar los últimos avances tecnológicos sobre las comunicaciones ópticas inalámbricas, ya que la introducción de OFDM significa que se requiere una nueva unidad para la normalización de dichas comunicaciones. No obstante, la contribución técnica del estándar IEEE P802.15 define la capa física, PHY, y la capa de control de acceso al medio (MAC). Éste estándar es capaz de ofrecer suficiente velocidad para transmitir servicios de audio, vídeo y multimedia, teniendo en cuenta la movilidad de la transmisión óptica, su compatibilidad con la iluminación artificial presente en las infraestructuras y en la interferencia que se pueda generar debido a la iluminación ambiente, además de, una capa MAC que admite enlaces visibles [14], [36]. Dicho estándar se incorpora a cualquier norma de seguridad ocular aplicable. La modificación de la norma que acabamos de mencionar se realiza en el *Reglamento IEEE 802.15.7 VLC* [37], donde se especifican los siguientes requisitos de seguridad:

Las regulaciones de parpadeo de la luz aplicadas en el estándar son las siguientes [37]:

- IEC 1000-3-3/EN 61000-3-3: Compatibilidad electromagnética. Parte 3: Límites-Secc. 3: Limitación de las fluctuaciones de tensión y parpadeo en las redes de alimentación de baja tensión para equipos con corriente nominal <16 A. 1994

- IEC 1000-3-5: Compatibilidad electromagnética. Parte 3: Límites – Cap. 5: Limitación de las fluctuaciones de tensión y del parpadeo en las redes de alimentación de baja tensión para los equipos con corriente de entrada superior a 16 A. 1994

Las regulaciones de la fuerza de la luz visible en el estándar [37] son:

- IEC 60825: Seguridad del láser
- ANSI Z136: Normas de seguridad láser-ANSI
- EN 207: Norma europea para gafas de seguridad laser.
- IEC 62471: Nueva seguridad de la lámpara.

La diferencia entre el estándar propuesto dentro del IEEE 802.11 y los ya existentes como IEEE 802.15 LC es el uso del 802.11 MAC. Estos cambios están dirigidos a la integración de los puntos VLC en la red celular mediante Internet. Con esto se garantiza que VLC estará centrada en las redes de área locales inalámbricas basándose en los estándares ya existentes como IEEE 802.15.7m y IEEE 802.15.13, donde se centran en la implementación de tecnología para redes inalámbricas especializadas donde es requieren menos eficiencia energética [13].

1.6. Estado socio-económico. Industria 4.0

El uso de las comunicaciones ópticas por cable (en inglés, *Optical Wireless Communications*, OWC) ha sido estudiado durante la última década como complemento a los sistemas basados en radiofrecuencia. Un ejemplo es el uso de dicha tecnología para la comunicación en entornos industriales. En este proyecto haremos uso de las comunicaciones ópticas por cable para ofrecer conectividad en un túnel en construcción.

Esta aplicación resulta interesante por las razones que mencionaremos a continuación. En primer lugar, el confinamiento espacial inherente a las portadoras ópticas proporciona una mayor seguridad, permitiendo arquitecturas de redes de comunicación que cuentan, en zonas de baja latencia, con sistemas de control seguros de bucle cerrado. En segundo lugar, gracias a la disponibilidad de frecuencias ópticas no reguladas, sin utilizar y libres de interferencias, existe la posibilidad de una rápida extensión de las redes cableadas industriales que existen actualmente a soluciones híbridas que integren radiofrecuencia y enlaces inalámbricos ópticos sin necesidad de reestructurar toda la infraestructura de comunicaciones [3].

Para el diseño del enlace de OWC en aplicaciones industriales se utilizan Luminarias LED estándar, ya que se requiere baja tasa de datos. A su vez, el enlace óptico debe ofrecer conectividad a dispositivos que se muevan rápidamente a distancias de 3-4m. Así mismo, es necesario brindar fiabilidad en la conexión y minimizar la latencia al orden de milisegundos [3]. En el [apartado 5](#) se evaluarán dichas especificaciones para un sistema de comunicación óptica instalado en un túnel.

Además, tal y como se ha señalado en apartados anteriores, típicamente las comunicaciones ópticas por cable se posicionan como una de las tecnologías apropiadas para dar soporte al concepto IoT, dentro del marco de la Industria 4.0. Esta aportación, como se explica en el artículo publicado en Forbes [41], supone una evolución en el modelo de negocio de las industrias. Una de las consecuencias más inmediata de la

evolución tecnológica es el avance de la automatización, cuyo resultado supone una rápida transformación del mundo laboral. Según McKinsey, estipula que para el año 2030 la situación laboral de hasta 375 millones de trabajadores podría cambiar y, el trabajo digital podría aportar 2,7 billones de dólares al PIB mundial para el 2025 [41].

En este contexto, el artículo [41] destaca cuatro áreas de impacto:

1. **Impacto tecnológico:** Para la mayoría de las industrias (como por ejemplo, logística, construcción, aeroespacial, etc.), la evolución de la Industria 4.0 impulsará a que las empresas se automaticen con el objetivo de mantener su competitividad dentro de la perspectiva global.
2. **Impacto económico:** Los cuatro factores de producción que favorecen el desarrollo económico son la tierra, el trabajo, el capital y la empresa. La capacidad empresarial mundial de hoy en día es del 52% y, a medida que avanzan los años va disminuyendo. Para las grandes empresas, la evolución tecnológica no supone un reto difícil, debido a su capacidad para adaptarse a los cambios. No obstante, el mundo debe apoyar a las pequeñas y medianas empresas, ya que son el combustible de la economía en la actualidad.
3. **Impacto social:** Hoy en día, la tecnología continúa evolucionando los valores sociales. Por ejemplo, más del 36 % de los trabajadores de los EE.UU son autónomos, ya que el avance tecnológico permite trabajar a las personas en cualquier momento y lugar. En [41] estipulan que para el 2027, más de la mitad de los trabajadores serán freelance.
4. **Impacto en educación y captación:** El desarrollo económico de las empresas depende de la capacidad de captación de empleados. Típicamente, se centran en las habilidades necesarias para lograr sus objetivos comerciales sin dejar de ser competitivos y ágiles, esto les exige garantizar a sus trabajadores la captación necesaria con el fin de cubrirlas.

En resumen, como se menciona en el artículo “*How The Fourth Industrial Revolution Is Impacting The Future of Work*” [41], publicado en octubre del 2018, “*la cuarta revolución industrial nos brindará la oportunidad de aprender y enseñar nuevas habilidades, crear nuevos empleos que requieran combinaciones de habilidades únicas que no existen hoy en día, explorar talentos que no conocíamos y, al hacerlo, hacer crecer nuestros negocios y crear una nueva generación de trabajadores altamente calificados en áreas más diversas*” [41].

1.7. Objetivos del proyecto

Para la resolución del presente proyecto planteamos obtener los siguientes objetivos:

- Caracterizar la transmisión de datos mediante un sistema VLC en entornos industriales, concretamente en construcción de túneles.
- Proponer un modelo de sistema real, donde el transmisor está compuesto por luminarias basadas en la tecnología LED de 35 W y un receptor reconfigurable, formado por N fotodiodos.
- Garantizar una velocidad de transmisión de datos de al menos 1 *Mbit/sec*.
- Evaluar el sistema de transmisión de datos aplicando la tasa de errores *Symbol Error Rate* (SER).

El trabajo realizado a lo largo del presente proyecto se ha presentado como parte del artículo de investigación “*Characterization of the Visible Light Communications during the construction of tunnels*” en el congreso ISWCS’19, *16th International Symposium on Wireless Communication System*.

2. ESTADO DEL ARTE

Una vez introducido el marco industrial donde se planteará la aplicación de nuestro proyecto, en este apartado referenciaremos los estudios en los que se ha basado nuestra investigación sobre el entorno y la tecnología con la que trabajaremos. Con el objetivo de presentar un estado del arte que refleje la evolución del proyecto, organizamos las referencias de acuerdo a su aparición a lo largo del presente proyecto

Comenzamos nuestro estudio enmarcando el estado actual de las comunicaciones [1], [2]. En el artículo “*Coexistence of WiFi and LiFi Toward 5G: Concepts, Opportunities, and Challenges*” [1], publicado en febrero del 2016, se expone la situación de las comunicaciones en los últimos años. Provocado por la insaciable demanda de conectividad inalámbrica que solicitan los Smart phones, tablets y el crecimiento de *Internet of Things* surge la necesidad de explotar nuevas bandas de frecuencias, donde se consideran las Comunicaciones Inalámbricas Ópticas (OWC), especialmente basadas en las Comunicaciones mediante Luz Visible (VLC).

Nuestro proyecto está enfocado en aplicar la tecnología VLC en entornos industriales. Por esta razón, investigamos la situación actual mediante [2]-[5]. En “*Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment*” [3], publicado en enero del 2018, consideran la aplicación de las comunicaciones inalámbricas ópticas, como complemento a los sistemas basados en radiofrecuencia, para entornos industriales. Sin embargo, en las noticias [4], [5] destacan la escasa innovación que se ha aplicado en el sector de la construcción, siendo el menos digitalizado en España. En [5] plantean que la transformación del sector será impulsada por la Industria 4.0.

El concepto de *Internet of Things* es imprescindible en el marco de la Industria 4.0, tal y como lo reflejan en [6], [7]-[9]. *Internet of Things* es una de las soluciones que se plantan con el objetivo de conseguir una producción más eficiente y productiva [7]. En 2030 se estima que la Industria 4.0 sea una realidad en todas las fábricas, completando el periodo de revolución industria [8]. En [9] se muestran los avances que resultan tras la innovación de aplicar de IoT en la industria.

La Industria 4.0 se posiciona como el pilar de la tecnología inteligente, considerándose como una posible solución a los problemas que surgen en un entorno industrial si se trabaja con comunicaciones basadas en radiofrecuencia (RF). Es por ello que acudimos a [15] - [20], [23] - [26] para analizar los obstáculos que pueden presentarse en RF. En [15] - [19] analizamos las limitaciones que sufren las comunicaciones celulares, por un lado, provocadas por la limitación del espectro radioeléctrico [19] y por otro, debido a las interferencias que sufren las conexiones [18] junto con la incapacidad de proporcionar los datos necesarios al creciente número de dispositivos [16]. Otra de las soluciones a las comunicaciones RF planteadas son las ondas milimétricas, que propone el estándar 5G [20]. No obstante, con esta tecnología se complica las comunicaciones a largas distancias

[16], [20]. Además, otro de los problemas presentes es la falta de conectividad en entornos hostiles o rurales [23]-[25], junto con la latencia presente en entornos industriales [26].

Como hemos mencionado, nuestro proyecto propone las comunicaciones mediante luz visible para ofrecer conectividad en el marco de la Industria 4.0 [9], [32], [33], [35]. En el artículo “*Visible Light Communication: Opportunities, Challenges and the Path to Market*” [10], publicado en diciembre de 2013, se analizan las características de la tecnología VLC y las oportunidades que ofrece frente a las tecnologías basadas en RF. Una de las propiedades que debe cumplir la tecnología VLC consiste en trabajar a una frecuencia de modulación superior al umbral de fusión de parpadeo [32], [33], ya que es necesario garantizar que el parpadeo no pueda convertirse en un peligro para la salud. Además, un grupo de trabajo del IEEE está trabajando en normalizar las altas velocidades del VLC para la aplicación de la Industria 4.0.

El impacto socio-económico que supone la aportación de las comunicaciones ópticas al marco de la Industria 4.0 se basa en los artículos [3] y [41]. De nuevo, en “*Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment*” [3] consideran que el uso de las comunicaciones ópticas por cable resulta interesante para el entorno industrial ya que proporcionan seguridad, baja latencia, y a su vez, una rápida evolución de las redes industriales. Asimismo, en [41] señalan que el desarrollo de la Industria 4.0 supone una evolución del modelo de negocio de las industrias, donde una de las consecuencias más inmediatas es la rápida transformación que puede suponer para el mundo laboral.

En cuanto a las modulaciones, uno de los candidatos más adecuados para transmitir datos en sistemas VLC es la modulación de pulsos de una única portadora, tal y como se menciona en las referencias [27]-[30]. En este proyecto señalamos las modulaciones que se pueden aplicar a sistemas VLC, tales como la modulación binaria *On-Off Keying* (OOK), con la modulación por la posición de pulso, (PPM), la modulación por ancho de pulso, (PWM), o por la modulación de amplitud de pulso (M-PAM). Además, hacemos referencia a las modulaciones con multi-portadora en [27], [31]. En este proyecto nos apoyaremos en el modelo de sistema planteado en el trabajo “*On the Optimality of Precoding Schemes for Visible Light Communications*” [39], donde se aplica la modulación PAM en el transmisor.

3. SISTEMA ÓPTICO

En este apartado se especificará qué tipos de modulaciones disponibles se pueden aplicar a los sistemas VLC. A su vez se detallará el diseño del modelo de sistema que aplicaremos a nuestro proyecto, además de señalar y detallar la modulación que se utilizará.

3.1. Modelo del sistema

Tal y como se ha analizado en capítulos anteriores, dada las múltiples ventajas del VLC, destacando el bajo coste que supone la implementación debido al uso generalizado de adecuados dispositivos ópticos, el VLC es considerado un factor clave para la evolución de las comunicaciones inalámbricas. Los LEDs que se utilizan en dicho sistema deben proporcionar una iluminación constante a la vez que ofrecen la posibilidad de transmitir datos. Con el fin de ofrecer una iluminación apropiada, se suelen instalar varias luminarias LEDs en una sola habitación. De este modo, el enlace descendente del sistema VLC se configura como un sistema de múltiples transmisores. Si consideramos que los usuarios

están equipados con múltiples fotodiodos, el downlink puede ser tratado como un sistema multiusuario con múltiples entradas y salidas (MU-MIMO). La gestión de interferencia resulta complicada para estos sistemas, ya que no es posible la coordinación entre los receptores, de ahí que la reducción de interferencia deba realizarse en el lado del transmisor [39].

En sistemas RF, la implementación de esquemas TPC suele encontrar la dificultad de proporcionar información precisa sobre el estado del canal (CSI) dentro de un bloque de coherencia, es decir, el periodo durante el canal físico permanece constante, además de necesitar enlaces de retorno dedicados. Estos problemas se pueden solucionar en las redes VLC, dado que emplea modulación de intensidad (IM) y detección directa (DD) de forma incoherente [39], codificándose la información en la envolvente de la señal transmitida sin información de fase [27].

Es necesario destacar las limitaciones adicionales que condicionan a los transmisores ópticos. En primer lugar, debido al uso del IM/DD, la señal a transmitir debe tener un valor real y unipolar no negativo. Esta condición se satisface añadiendo una corriente de polarización continua $I_{DC} \in \mathbb{R}^+$, de esta manera, los valores negativos se contrarrestan obteniendo así una señal transmitida con valores reales positivos. Por esto, la potencia óptica que proporciona cada LED es lineal sobre una corriente $I \in [I_L, I_H]$, que corresponde al rango de potencia óptica $[0, P_{max}]$, tal y como se muestra en la siguiente figura.

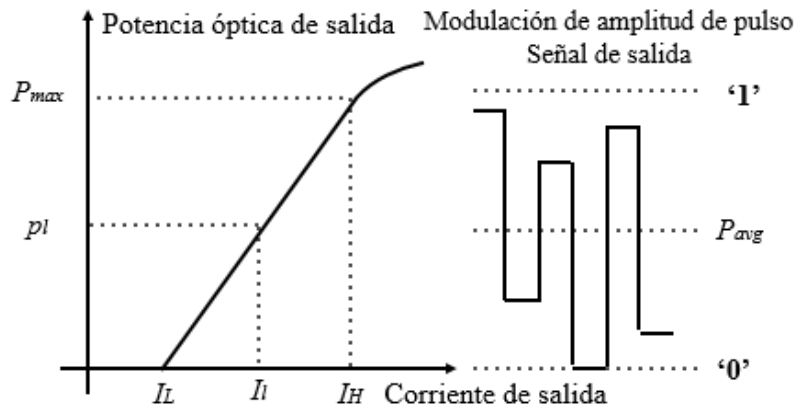


Figura 3.1. Potencia óptica que proporciona cada LED.
Tomada de la referencia [39].

Nótese que si los valores de señal superan el rango definido por la máxima potencia óptica con la que se puede transmitir, se genera una distorsión que recorta la señal. En segundo lugar, las luces LED tienen que proporcionar un brillo constante, tal y como se ha mencionado en el apartado [1.5.1. Características](#), y se ha detallado el estándar encargado de cumplir dicha condición en [1.5.3 Marco regulador](#), donde se explica que el ojo humano responde al promedio de las luces ópticas que superan la conocida frecuencia de fusión, cuya media es igual a la corriente de polarización I_{DC} .

En este proyecto nos apoyaremos en el modelo de sistema planteado en el trabajo [39] donde se considera un escenario interior para instalar el sistema VLC. Dicho sistema está compuesto con L transmisores LEDs, donde $l = \{1, \dots, L\}$. En [39] los transmisores cumplen con la condición indispensable de esta nueva tecnología, que como ya se ha mencionado en apartados anteriores, consiste en proporcionar una iluminación constante

a la vez que transmite datos a K usuarios, $k = \{1, \dots, K\}$. Se considerará, a diferencia del trabajo [39] un único transmisor óptico para evaluar el sistema. Además, para simplificar, suponemos que el transmisor óptico está compuesto por un solo LED. Por otro lado, cada usuario receptor estará equipado con N fotodiodos, $n = \{1, \dots, N\}$, donde cada fotodiodo proporciona una entrada de canal, sin embargo, los N fotodiodos estarán conectados a una única cadena de procesamiento de señal [39].

La señal transmitida por transmisor LED se representa con x . La señal que reciben los N fotodiodos del usuario K viene dada por la siguiente expresión [39]:

$$y^{[k]} = H^{[k]}x + z^{[k]} \quad (1)$$

Donde el vector $H^{[k]} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ representa la respuesta de canal conjunta del transmisor y los N fotodiodos del usuario K , su definición es la siguiente:

$$H^{[k]} = [h^{[k,1]} \dots h^{[k,N]}]^T \quad (2)$$

Donde $H^{[k]} = [h^{[k,1]} \dots h^{[k,N]}] \in \mathbb{R}_+^{N \times 1}$ y $h^{[k,N]}$ es la respuesta del correspondiente al transmisor L . Así mismo, vector $z^{[k]}$ representa valores reales del ruido aditivo blanco gaussiano, (AWGN) con media nula y la varianza cumple con $\sigma_z^2 = \sigma_s^2 + \sigma_{th}^2$, donde σ_s^2 es la variación del ruido de disparo y σ_{th}^2 es la variación del ruido térmico [39].

En este modelo consideraremos que el *Channel State Information*, (CSI), cambia de estado lentamente y es constante durante el intervalo de tiempo de transmisión (ITT), suponiendo que en ese periodo de tiempo el conjunto de transmisores conoce la topología de la red. A su vez, la máxima potencia óptica de cada transmisor, incluyendo el sesgo de continua para poder ofrecer iluminación, se representa como P_{LED} [39].

3.1.1. Modulaciones disponibles

Para transmitir datos en un sistema VLC es posible aplicar tanto en modulaciones con multi-portadora como mono-portadora.

3.1.1. A. Modulaciones disponibles mono-portadora

Uno de los candidatos más adecuados para transmitir datos en sistemas VLC es la modulación de pulsos de una única portadora. Para transmitir información se puede utilizar la modulación binaria *On-Off Keying* (OOK). Alternativamente, se puede codificar la información con la modulación por la posición de pulso, (PPM), que se genera mediante la modulación por ancho de pulso, (PWM), o por la modulación de amplitud de pulso (M-PAM).

- *On-Off Keying*, (OOK)

La modulación *On-Off Keying* (OOK) permite codificar la información y transmitirla, por ejemplo, de forma inalámbrica. Esta modulación es una versión mejorada de la modulación ASK (en inglés, *Amplitude Shift Keying*), la cual consiste en transmitir mediante el desplazamiento de amplitud, activando y desactivando una portadora senoidal con una señal binaria unipolar. El “cero lógico” de esta modulación se representa con una amplitud menor, mientras que el “uno lógico” se representa con una amplitud mayor. El problema de esta modulación es la interferencia de ruido, dificultando al receptor capturar correctamente la amplitud de la señal transmitida [29].

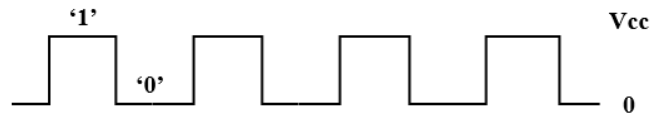


Figura 3.2. Modulación OOK

En cambio, la modulación OOK no trabaja con una portadora durante la transmisión del “cero lógico”, sino que se transmite durante el “uno lógico” [28], es decir, tiene dos estados de onda, encendido – cuando hay onda – y apagado – cuando no transmite la señal, de ahí su nombre On-Off Keying. De esta manera se distingue mejor el código transmitido y a su vez ayuda a conservar la energía de las baterías. Sin embargo, al solo contar con dos estados, los cuales corresponden a dos símbolos, con esta modulación se obtiene una baja eficiencia espectral.

- *Pulse Width Modulation, (PWM)*

Si transmitimos una señal mediante modulación por ancho de pulso, *Pulse Width Modulation, (PWM)* se emitirá con una determinada frecuencia (y por consiguiente con un determinado periodo) definida por dos valores fijos de tensión, el valor alto la amplitud, y el valor bajo, el valor nulo.

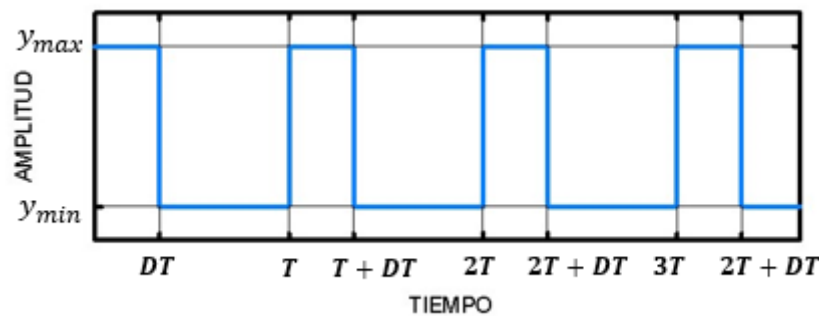


Figura 3.3. Modulación PWM.

Otros parámetros que caracterizan a dicha modulación son, en primer lugar, el ciclo de trabajo (duty cycle), define el porcentaje de tiempo que el pulso se encuentra en activo durante un periodo. En segundo lugar, se encuentra el ancho de pulso, *Pulse Width (PW)*, que define el tiempo de duración del pulso [30].

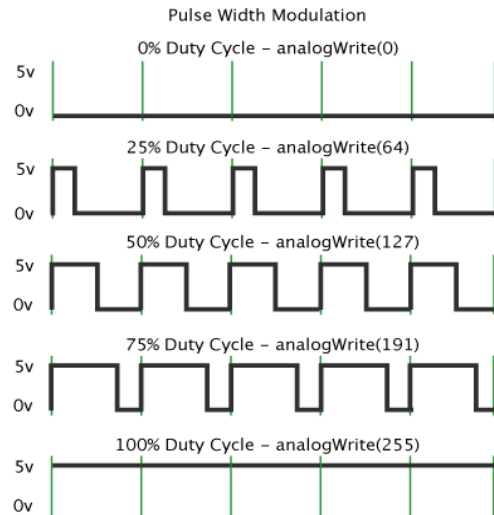


Figura 3.4. Ejemplo *Pulse Width Modulation*. Tomada de la referencia [30]

En resumen, la técnica PWM consiste en variar el ancho del pulso de la señal cuadrada de voltaje con el propósito de examinar la cantidad de potencia transmitida.

- *Pulse Position Modulation, (PPM)*

La modulación por Posición de Pulso (PPM) se basa en el desplazamiento de los pulsos desde una posición de referencia hasta otra, dependiendo del valor de la señal transmitida. Dicha modulación se caracteriza por tener la amplitud y el ancho de pulso fijo, el único parámetro variable es la posición de dichos pulsos. La variación dependerá de la amplitud de la señal moduladora.

Para generar una señal PPM lo más apropiado es utilizar como referencia la señal PWM ya generada y así accionar un generador de pulsos de ancho constante justo en los flancos de bajada de la señal de referencia PWM. En la siguiente imagen podemos apreciar cómo se generan:

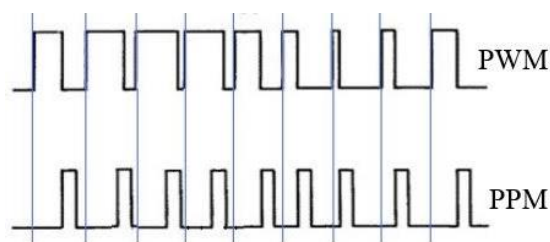


Figura 3.5. Ejemplo *Pulse Position Modulation*

La modulación PPM se suele aplicar en sistemas de comunicación óptica. Sin embargo, este tipo de modulación es sensible a la interferencia producida por múltiples caminos, que surge en los canales con desvanecimiento caracterizados por ser selectivos en frecuencia.

Por lo tanto, volviendo al entorno de construcción en túneles, donde se espera una contribución elevada debido a reflexiones, esta modulación no parece la más adecuada a pesar de su eficacia.

- *Pulse Amplitude Modulation, (PAM)*

Tal y como se explica en [27], la modulación por amplitud de pulsos, *Pulse Amplitude Modulation, (PAM)* es la más sencilla de todas, respecto a las modulaciones digitales.

El tratamiento de la señal, si aplicamos esta modulación, consiste en cambiar su amplitud, trabajando a una frecuencia fija, en función del símbolo que se vaya a transmitir. Dependiendo del número de símbolos que se vayan a transmitir la modulación se llamará M-PAM, pudiendo ser 2-PAM, 4-PAM, 260PAM.

En esta modulación [27], serán constantes la separación y la anchura de los pulsos, siendo la amplitud la única propiedad que varía según el valor de la amplitud de la moduladora, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen. Además, es necesario destacar que dichas amplitudes pueden tener valores reales o complejos.

En [27] se afirma que, si se permite una mayor SNR en el balance de enlace, trabajando con una mono-portadora y la modulación PAM, se podrá aumentar la eficiencia espectral del sistema codificando la información en la amplitud del símbolo transmitido. Este trabajo se considerará PAM como esquema a utilizar en el transmisor.

3.1.1. B. Modulaciones disponibles multi-portadora

En modulaciones con multi-portadora, la información se codifica en sub-portadoras con valores complejos utilizando el esquema de modulación M-QAM. Tanto en el transmisor como en el receptor se utilizan las transformadas IFFT y FFT como técnicas de multiplexación y de-multiplexación. Al imponer la simetría Hermítica de las sub-portadoras OFDM, se obtiene una señal real en el dominio del tiempo. Tras obtener dicha señal real, se proponen dos tipos de modulaciones OFDM con el fin de conseguir la unipolaridad de la misma. Dichas modulaciones son OFDM óptica con señal de bias continua (DCO-OFDM, DC-biased Optical OFDM) y OFDM óptica asimétricamente recortadas (ACO- OFDM, Asymmetrically Clipped OFDM). La configuración unipolar se define mediante el escalado de la señal y polarización de corriente continua (CC) dando como resultado una distorsión no lineal de las señales dentro del dominio temporal.

En O-OFDM para modular la intensidad del LED se utiliza la envolvente de la señal trabajando en el dominio temporal. Por ello, es necesario que la señal tenga valores reales y positivos. Como se ha mencionado, una señal real se consigue imponiendo la simetría Hermítica de las sub-portadoras OFDM. A su vez, para obtener una señal no negativa, conocida como O-OFDM de corriente directa (DCO-OFDM), se añade un offset de corriente continua al símbolo de OFDM, tal y como se explica en [27].

En cuanto a la eficiencia energética, debido a la introducción del mencionado nivel de offset, esta modulación es menos eficiente. No obstante, si se trabaja con comunicaciones VLC esta propiedad se convierte en una ventaja. Esto es porque en VLC, además de datos, se ofrece iluminación, por ello es necesario un nivel de continua. Esta característica, según [31], posiciona a DCO-OFDM como una de las modulaciones principales en Comunicaciones mediante Luz Visible.

Armstrong et Al., propusieron la técnica conocida como O-OFDM con recorte asimétrico (ACO-OFDM). Con el fin de eliminar la parte negativa de la señal, condición ya mencionada para trabajar con comunicaciones VLC, se habilitan las sub-portadoras

impares para la transmisión de datos, mientras que las sub-portadoras pares se ajustan a cero, tal y como se explica en [27]. De esta manera la parte negativa de la señal podrá ser recortada en el transmisor. El ruido obtenido al recortar la señal afecta a las sub-portadoras pares, pero al tener éstas valores nulos, no se producirá una distorsión en las sub-portadoras impares, transmitiendo de manera satisfactoria la información al receptor.

La modulación ACO-OFDM, en comparación con el DCO-OFDM, se utiliza para conseguir mejorar la eficiencia espectral en la región de bajo nivel de SNR, contando con una reducción del 50% en la eficiencia espectral en altos niveles de SNR.

No obstante, el uso de modulaciones multi-portadora está planificado como un futuro trabajo más allá de este proyecto.

3.1.1. C. PAM, Pulse Amplitude Modulation

En nuestro proyecto aplicaremos a nuestro sistema de comunicaciones la modulación M-PAM, ya que es la modulación más sencilla, respecto al resto de modulaciones digitales y, a su vez, es la modulación menos sensible a los rebotes. Antes de meternos de lleno con el modelo utilizado en el transmisor, detallaremos las principales características de la modulación con la que vamos a trabajar. El diagrama de bloques que representa a la modulación M-PAM se presenta en la siguiente figura:

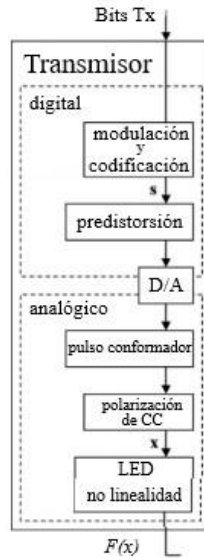


Figura 3.6. Diagrama de bloques de una modulación PAM.
Tomado de la referencia [27]

En este contexto, los bits de entrada equiprobables $\log_2(M)$ equivalen a un símbolo definido en el dominio del tiempo, con un ancho de banda de $B = 1/T_s$ y una duración de T_s para una tasa de símbolos de $R_s = B$. Los símbolos se asignan a los niveles actuales de $\rho \sqrt{3 P_{s(elec)}} / \sqrt{(M-1)(M+1)}$, $\rho = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)$, y estos se agrupan en el tren de símbolos L , s_l . Aquí, la energía por bit es $E_{b(elec)} = P_{b(elec)} / B = P_{s(elec)} / (\log_2 M) B$. El resultado es una eficiencia espectral de $\log_2 M$ bits/s/Hz.

Por ejemplo, si $M = 2, 4$ la eficiencia espectral que obtendríamos sería la siguiente:

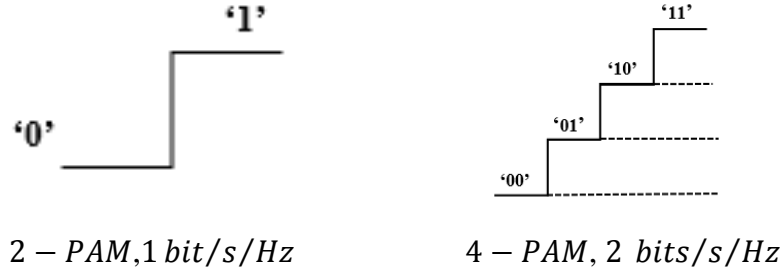


Figura 3.7. Eficiencia espectral.

Conforme aumenta la modulación, la probabilidad de error aumenta.

El tren de símbolos está pre-distorsionado, escalado y pasado por el DAC (*Digital Analog Converter*). A continuación se aplica un filtro de conformación de pulsos. Ya que el tren de símbolos s_l es bipolar, es necesario un sesgo de corriente continua, β_{DC} , para ajustarse dentro del rango dinámico del transmisor lumínico.

La señal se transmite a través del canal inalámbrico óptico y es distorsionada por el ruido blanco y gaussiano (AWGN), w_l , en el receptor. La señal recibida, y_l , se sincroniza y pasa a través del correspondiente filtro. Como resultado, la SNR eléctrica efectivo por bit en M-PAM, $\Gamma_{b(elec)}$, se puede expresar en función del SNR eléctrico no distorsionado por bit en el transmisor, $\gamma_{b(elec)}$, de la siguiente manera [27]:

$$\Gamma_{b(elec)} = \gamma_{b(elec)} G_{EQ} G_{DC} \quad (3)$$

Donde, G_{EQ} , es el factor de ganancia del ecualizador. El factor G_{DC} denota la atenuación de la potencia de la señal eléctrica útil de la señal x debido a la componente DC. En general, la suma del sesgo CC influye en la potencia eléctrica útil de la señal de dominio temporal sesgada. La suma de la potencia eléctrica útil de corriente alterna (CA) y la potencia eléctrica de CC da como resultado la potencia eléctrica total. Por ello, para obtener un valor de potencia total fija, la suma del sesgo de CC reduce la potencia eléctrica útil de CA de la señal.

Teniendo en cuenta el AWGN, una aproximación ajustada para obtener una BER inferior a 10^{-2} se puede obtener considerando el error aportado solo por los símbolos más cercanos a la constelación, así como se muestra en la siguiente expresión [27]:

$$BER = \frac{N_s}{G_{DC} \log_2 M} Q \left(d_s \sqrt{\frac{\log_2 M}{2\Gamma_{b(elec)}}} \right) \quad (4)$$

Donde G_{DC} es el factor de ganancia de la modulación M-PAM.

En la modulación M-PAM, un símbolo deseado tiene un número medio de símbolos adyacentes, $N_s = 2(M - 1)/M$. La ganancia introducida por la codificación Gray de los bits se determina como $G_{GC} = 1$. La distancia entre un símbolo previsto y el símbolo interferente más cercano se define de la siguiente manera [27]:

$$d_s = \sqrt{12/(M^2 - 1)} \quad (5)$$

Sin embargo, en un entorno industrial como la construcción de un túnel, el canal AWGN es demasiado optimista. En nuestro caso, el canal estará compuesto por una componente de visión directa, *Line-of-Sight* (LoS), y otra componente reflexiva de visión no directa, *Non-Line-of-Sight* (NLoS). Por tanto, es necesario realizar un análisis teniendo en cuenta las reflexiones debidas a la estructura del túnel.

3.2. Transmisor con M-PAM

Tras introducir la modulación con la que trabajaremos, describiremos la configuración de transmisor. Consideraremos, tal y como ya hemos mencionado, una modulación de amplitud de pulso (PAM) con polarización continua para la transmisión de datos, añadiendo un valor de corriente continua I_{DC} . Aplicaremos entonces la configuración del transmisor que se describe en el trabajo [39].

Consideramos que están presentes en el sistema K usuarios, los datos transmitidos a estos K usuarios son dados por

$$s = [s^{[1]}, \dots, s^{[k]}]^T \quad (6)$$

Donde $s^{[k]}, k = \{1, \dots, K\}$, es el símbolo destinado al usuario K . Para una constelación de M-PAM cada símbolo puede tomar M todos los valores posibles siempre dentro del rango $[-1, 1]$. Por lo cual, la media del símbolo transmitido es $E[s] = 0$. Así, la señal transmitida por los L LEDs viene dada por:

$$x = s + I_{DC} \quad (7)$$

Con el fin de asegurar el funcionamiento lineal de los dispositivos LED, la señal transmitida debe encontrarse dentro de los límites de la potencia de salida de los LEDs, cumpliendo [39]:

$$0 \leq x_l + p_l \leq P_{led} \quad (8)$$

Donde $x_l = \sum_{k=1}^K s^{[k]}$ y p_l corresponde a la potencia del sesgo de CC. Ya que $s_l \in [-1, 1]$ por definición, la potencia de cada transmisor se encuentra entre los siguientes límites:

$$0 \leq -\sum_{k=1}^K s^{[k]} + p_l \leq P_{led} \quad (9)$$

El cual se puede reescribir como $|\sum_{k=1}^K s^{[k]}| \leq P'$ donde $P' = \{p_l, P_{led} - p_l\}$. De donde resulta que p_l es la potencia óptica resultante debido a la corriente continua.

3.3. Canal óptico

En este proyecto se considerará instalar nuestro sistema VLC en un escenario interior, concretamente en un túnel. En este contexto, la respuesta del canal constará de una componente de desvanecimiento plano, con visión directa, y una componente difusa como resultado de las posibles reflexiones producidas en las paredes, techo y suelo. Basamos así, nuestro estudio en el canal propuesto en el trabajo [39]. Explicaremos a continuación las características del canal que utilizaremos.

Trabajando en el dominio de frecuencia, el impulso del canal producido entre el transmisor l y el fotodiodo n del usuario K , a la frecuencia f se define como sigue:

$$h_l^{[k,n]}(f) = (h_{LOS,l}^{[k,n]} + h_{NLOS}(f))h_{F-E}(f) \quad (10)$$

Donde $h_{LOS,l}^{[k,n]}$ corresponde a la componente de visión de línea directa, también conocida en inglés como *Line of Sight* (LoS), $h_{NLOS}(f)$ es la contribución de las reflexiones difusas sin visión directa, es decir, sin LoS, también denominado *Non Line of Sight*, (NLoS). Por último, $h_{F-E}(f)$ es la respuesta en frecuencia del dispositivo frontal.

- Componente *Line of Sight* (LoS)

La componente LOS se determina como inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el transmisor l y el usuario K . Nombraremos de ahora en adelante dicha distancia como d_{kl} . Al estar trabajando con rayos de luz es necesario definir los ángulos de radiación e incidencia para poder determinar la geometría del problema y así caracterizar mejor el canal.

Se define entonces, el ángulo de radiación que determina la inclinación de la “línea de visión” desde el transmisor l como $\phi_l^{[k,n]}$ hacia el fotodiodo n del usuario K . A su vez es necesario definir el ángulo que se produce al incidir el rayo de luz sobre el fotodiodo n del usuario K como $\phi_l^{[k,n]}$, tal y como se presenta en la siguiente figura.

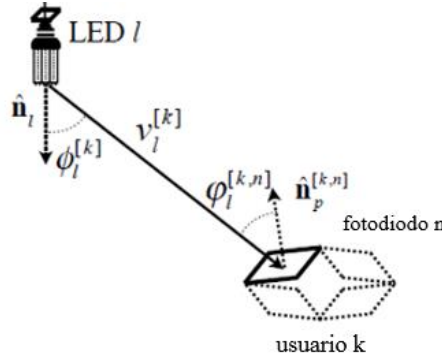


Figura 3.8. Geometría del entorno considerado que corresponde con los ángulos de radiación e incidencia del par transmisor-fotodiodo

El ángulo de radiación se puede aproximar tal que $\phi_l^{[k,n]} \approx \phi_l^{[k]}$ si se tiene en cuenta que el tamaño de los fotodiodos es de menor orden de magnitud que la distancia a la que se encuentra cualquier transmisor. Además, la componente LoS se define como la ganancia de corriente continua dada por la siguiente fórmula [39]:

$$h_{LOS,l}^{[k,n]} = \begin{cases} \frac{\gamma A(m+1)}{2\pi d_{kl}^2} T(\phi_l^{[k,n]}) \cos^m(\phi_l^{[k]}) \cos^r(\phi_l^{[k,n]}) & \text{si } 0 \leq \phi_l^{[k,n]} \leq \Psi_c \\ 0 & \text{si } \phi_l^{[k,n]} \geq \Psi_c \end{cases} \quad (11)$$

Donde γ es la respuesta del fotodiodo y A es el área de detección, m es el índice Lambertiano relacionado con el semitriángulo transmisor $\phi_{1/2}$ de forma que [39]

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\phi_{1/2}))} \quad (12)$$

Con el fin de simplificar la expresión, suponemos que el área de detección y de responsividad son la misma para cada fotodiodo. Donde $T(\varphi_l^{[k,n]})$ es la ganancia del filtro óptico y del concentrador, r se corresponde con el fotodiodo asociado al campo de visión Ψ_c . Para simplificar la complejidad, consideramos al igual que en [39] filtros planos consiguiendo así que la respuesta del canal no dependa del ángulo de incidencia, de esta forma $T(\varphi_l^{[k,n]}) = T$ [39].

Es necesario destacar que la componente $h_{LOS,l}$ es típicamente la mayor componente y su respuesta depende del ángulo de incidencia.

- **Componente *Non Line of Sight*, (NLoS)**

La componente NLoS en el dominio de la frecuencia se define como [39]

$$h_{NLOS}(f) = \eta_{NLOS} \frac{e^{-j2\pi f \Delta T}}{1 + j \frac{f}{f_D}} \quad (13)$$

Donde f_D es la frecuencia de corte a 3 dB perteneciente al canal óptico difuso, T es el retardo producido entre la componente incidente (LoS) y la componente reflejada (NLoS) y a su vez, η_{NLOS} es la eficiencia de la componente reflejada representada como [39]:

$$\eta_{NLOS} = \frac{A}{A_{room}} \frac{\rho_1}{1 - \rho} \quad (14)$$

Donde A_{room} es el área de la superficie donde instalamos el sistema, en este caso el escenario interior, 1 corresponde a la reflexión de la región que ha sido inicialmente iluminada por los LEDs y ρ es la reflexión media producida en las paredes. En [39], al igual que se ha asumido en otros trabajos similares $\rho_1 = \rho$.

Por último, la respuesta en frecuencia del front-end se modela de la siguiente manera [39]:

$$h_{F-E}(f) = e^{-\frac{f}{1.44f_m}} \quad (15)$$

Donde f_m representa el ancho de banda de los LEDs a -3 dB.

Destacar que estas componentes no dependen del ángulo de incidencia. Además, al ser el canal óptico constructivo, las componentes difusas pueden ayudar a recibir información cuando no hay visión directa (LoS) o cuando el ángulo de incidencia se aproxime al FoV.

3.4. Receptor

Con el propósito de proporcionar diversidad al sistema o aumentar la cantidad de campos de visión directa, consideraremos receptores compuestos por multi-diodos donde cada fotodiodo se caracteriza por un ángulo de orientación de recepción, *Reception Orientation Angle* (ROA), distinto con el objetivo de ofrecer distintas respuestas de canal independientes entre el conjunto de fotodiodos de cada usuario. No obstante, cada respuesta depende del ángulo de incidencia. Este receptor se plantea en [39] con el propósito añadido de reducir la interferencia a la vez que se consigue ganancia por diversidad. En resumen, cada usuario contará con un receptor compuesto por N fotodiodos.

Asumimos entonces que la orientación de cada fotodiodo se determina por su ángulo azimutal denotado como $\theta^{[k,n]}$ y su ángulo polar $\alpha^{[k,n]}$, tal y como se muestra en la siguiente figura [39].

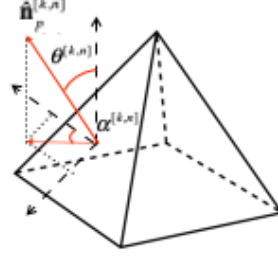


Figura 3.9. Vector de orientación del fotodiodo n del usuario k determinado por su ángulo azimutal y polar

De esta manera, se definirá la orientación de cada fotodiodo mediante los ángulos mencionados. Así, el vector de orientación del fotodiodo N expresado mediante coordenadas cartesianas es el siguiente [39]:

$$\hat{n}_p^{[k,n]} = [\text{sen}(\theta^{[k,n]}) \cos(\alpha^{[k,n]}), \text{sen}(\theta^{[k,n]}) \text{sen}(\alpha^{[k,n]}), \cos(\theta^{[k,n]})] \quad (16)$$

En relación con el vector de radiación, teniendo en cuenta que el ángulo de radiación no depende del vector de orientación, contando a su vez con que los LEDs apuntan hacia el suelo, el vector de radiación se define como:

$$\hat{n}_l = [0, 0, -1] \quad (17)$$

Sin embargo, si queremos aplicar iluminación a los túneles, la luminaria LED suele estar orientado con un ángulo de 45° hacia el interior del túnel, de modo que, asumiendo dicho ángulo, el vector de radiación se define como:

$$\hat{n}_l = [1, 0, -1] \quad (18)$$

Por otro lado, en la Figura 3.8 podemos observar que el ángulo de incidencia está compuesto por el vector de orientación del fotodiodo y por la línea de visión. Tras definir el vector de orientación de cada fotodiodo, los ángulos de radiación e incidencia se definen como sigue [39]:

$$\phi_l^{[k]} = \arccos\left(\frac{\hat{n}_l \cdot v_l^{[k]}}{\|\hat{n}_l\| \|v_l^{[k]}\|}\right) \quad (19)$$

$$\varphi_l^{[k]} = \arccos\left(\frac{v_l^{[k]} \cdot \hat{n}_p^{[k,n]}}{\|v_l^{[k]}\| \|\hat{n}_p^{[k,n]}\|}\right) \quad (20)$$

Donde $v_l^{[k]}$ es el vector que viene del transmisor LED l y del usuario k , tal y como se puede apreciar en Figura 3.8.

En el receptor, los fotodiodos se agrupan dentro de un área dedicada a este fin, que se conoce como AD. Por consiguiente, si suponemos que los usuarios están equipados por N fotodiodos, el área de detección de cada fotodiodo se define como $A_{pD} = \frac{A_D}{N}$. En relación con dicha área, es importante señalar que el ruido en el receptor es proporcional

al área de detección del fotodiodo. Por otro lado, la densidad espectral de potencia del ruido (PSD) se calcula como [39]:

$$N_0 = N_{0,s} + N_{0,ab} + N_{0,th} \quad (21)$$

Donde $N_{0,s}$ y $N_{0,ab}$ se corresponden con el ruido de disparo debido al despliegue del LED junto con la iluminación ambiental, respectivamente. A su vez $N_{0,th}$ representa el ruido térmico en el circuito receptor. El ruido de disparo debido a la señal óptica transmitida se define como [39]:

$$N_{0,s} = 2qP_{rx}\gamma \quad (22)$$

Donde q es la carga del electrón ($q = 1.6 \times 10^{-19} C$), y P_{rx} es la potencia óptica recibida, $P_{rx} = P_{led}h^{[k,n]}$. Para simplificar, la P_{rx} se fija al nivel máximo de iluminación, que suele obtenerse en el centro del escenario. Como la potencia óptica recibida se define por el canal resultante entre el transmisor óptico y el fotodiodo, se deduce que el ruido de disparo producido por la transmisión del LED es proporcional a la zona de detección. Acerca del ruido de disparo producido por la iluminación ambiental, se define como [39]:

$$N_{0,ab} = 2qE_rA_{PD}\gamma \quad (23)$$

Donde E_r es la energía de la luz ambiental. Por último, el ruido térmico viene dado por

$$N_{0,th} = \frac{4KT_{eq}}{R_L} \quad (24)$$

Donde K representa la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), T_{eq} es la temperatura equivalente en el receptor y R_L es la resistencia de carga del circuito del receptor.

4. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL ÓPTICO EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

Como se ha mencionado anteriormente, nuestro sistema VLC se instalará en un entorno interior, concretamente en un túnel. Contamos con que el túnel aún se encuentra en fase de construcción, donde no existe más “tecnología” que el cableado de luz.

En este apartado plantearemos una solución rápida de comunicaciones basada en una red de luminarias. Las características de dicha red son las siguientes:

- Para cumplir los niveles iluminación necesarios en el túnel se establece una luminaria cada 15m de 35 W cada una, y una de cada tres será destinada a luz de emergencia.
- Las dimensiones y geometría del túnel se especifican en la siguiente figura:

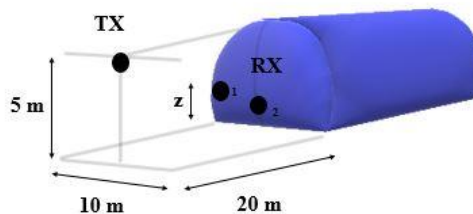


Figura 4.1. Dimensión del túnel vista 3D.
Los receptores 1 y 2 son los casos que evaluaremos.

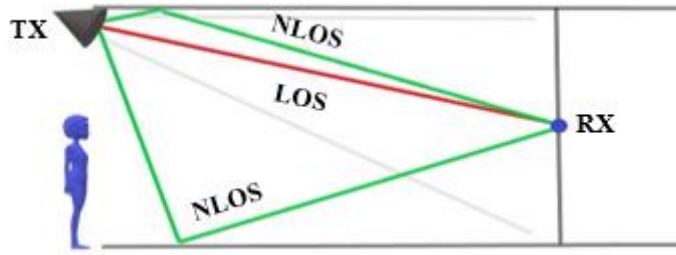


Figura 4.2. Vista 2D de la geometría del túnel.

- Las paredes del túnel son de hormigón proyectado, donde el hormigón se define lumínicamente con un índice de reflexión de 0.4 [40].
- Como conexión al exterior se cuenta con un tendido de corriente eléctrica de 380v-220v.

En primer lugar realizaremos un análisis del problema a tratar. En segundo, caracterizaremos el canal. Por último realizaremos un estudio de la tasa *Symbol Error Rate* (SER), realizando simulaciones de una transmisión.

4.1. Especificaciones del problema

En este apartado especificaremos los parámetros que hemos considerado para nuestro sistema VLC. En la siguiente tabla mostramos cada parámetro con su correspondiente valor.

PARÁMETROS	VALORES
Número de transmisores LED	1
Responsividad del detector γ	0,53 A/W
Ancho de banda	20 MHz
Área del fotodiodo A	1 cm ²
Ganancia del filtro óptico T	1
Semiángulo de transmisión $\phi_{1/2}$	70°
Densidad espectral de ruido impulsivo y térmico $N_{0,st} + N_{0,th}$	10 ⁻²² A ² /Hz
Ruido impulsivo por la iluminación ambiental $N_{0,ab}$	0 A ² /Hz ($Er = 0$, interior túnel)
FOV del receptor ψ_c	70°
Fotodiodo asociado al campo de visión r	1
Frecuencia <i>cut-off</i> de modulación del LED f_m	30 MHz

Tabla 4.1. Parámetros VLC

4.2. Caracterización del canal

Antes de comenzar a analizar el problema es necesario destacar que Matlab por defecto trabaja en el primer cuadrante. Si planteamos, para nuestro modelo, un sistema de coordenadas de tres dimensiones, el eje vertical se corresponde con el eje z y el horizontal, con el eje x . El transmisor se sitúa orientado hacia el primer cuadrante, es decir, con z y

x positivos. Sin embargo, el receptor se orienta hacia el segundo cuadrante, con z positivo y x negativo. Por este motivo, aunque el canal que hemos definido trabaja con valores positivos de φ_l , desplazaremos el ángulo obtenido 90° a la izquierda para situar dicho ángulo en el cuadrante que le corresponde. Como resultado, trabajaremos con valores negativos de φ_l , tal y como se muestra en la siguiente figura.

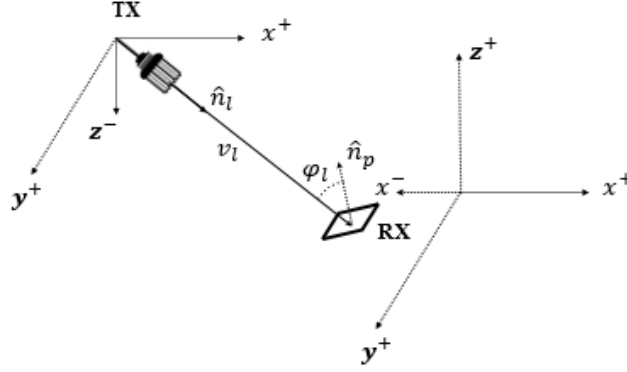


Figura 4.3. Orientación del transmisor y receptor.

Realizaremos un primer análisis del comportamiento de la componente LoS del canal en función de la distancia y frecuencia. Para ello se variará la orientación del fotodiodo receptor. A continuación, se realizará un estudio similar del comportamiento de la componente NLoS, también en función de la distancia y en función de la frecuencia. Recordemos que no aplicaremos ningún tipo de codificación a nuestro sistema.

4.2.1. Caracterización del canal LoS

El canal LoS es la representación de la componente de visión directa, también conocida como *Line of Sight* (LoS). Dicha componente define el canal existente entre el transmisor y receptor, separados a una distancia d_{kl} . Para nuestro proyecto, esa distancia variará de $0m$ hasta $20m$. Los ángulos de radiación e incidencia que determinan la orientación del transmisor y receptor respectivamente se definen como sigue:

Ángulo de radiación: $\phi_l^{[k]} = \arccos\left(\frac{\hat{n}_l \cdot v_l^{[k]}}{\|\hat{n}_l\| \|v_l^{[k]}\|}\right)$

Donde:

- \hat{n}_l es el vector de orientación del transmisor LED, siendo su posición la siguiente:

$$\hat{n}_l = [1, 0, -1]$$

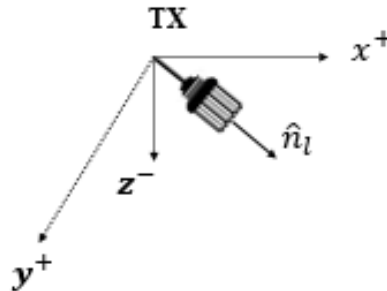


Figura 4.4. Orientación del transmisor LED

- $v_l^{[k]}$ es el vector que define la línea de visión directa entre el transmisor y receptor, como se puede apreciar en la figura (4) (de momento es ese número). Lo calculamos como sigue:

$$v_l^{[k]} = \text{posición}_{tx} - \text{posición}_{rx} \quad (25)$$

La luminaria led la se encuentra colocada en el centro del techo del túnel:

$$\text{posición}_{tx} = [0,5,5]$$

En este caso contamos con que el receptor tiene una altura de $1,5m$ y recorre una distancia de $20 m$. Entonces la posición del receptor se define como sigue:

$$\text{posición}_{rx} = [d, 0, 1.5]$$

Cabe destacar la situación del usuario receptor en el eje y . Lo situamos en $y = 0$, es decir, junto a la pared del túnel, teniendo en cuenta que la maquinaria se suele situar en el centro y los usuarios receptores en los laterales. También se puede dar que se coloquen los sensores IoT pegados a la pared.

- $\|\hat{n}_l\|$ es el módulo del vector de orientación del transmisor LED.
- $\|v_l^{[k]}\|$ es el módulo del vector $v_l^{[k]}$.

$$\text{Ángulo de incidencia: } \varphi_l^{[k]} = \arccos\left(\frac{v_l^{[k]} \cdot \hat{n}_p^{[k,n]}}{\|v_l^{[k]}\| \|\hat{n}_p^{[k,n]}\|}\right)$$

Donde:

- $\hat{n}_p^{[k,n]}$ es el vector de orientación del fotodiodo receptor, definido en Figura 3.9. [46]:

$$\hat{n}_p^{[k,n]} = [\text{sen}(\theta^{[k,n]}) \cos(\alpha^{[k,n]}), \text{sen}(\theta^{[k,n]}) \text{sen}(\alpha^{[k,n]}), \cos(\theta^{[k,n]})]$$

Los valores de α y θ definen el ángulo de orientación del fotodiodo receptor. El valor de α determina la cara de la pirámide. El valor de θ determina el ángulo de inclinación del fotodiodo con respecto al eje z , tal y como se muestra en la Figura 3.9.

- $\|\hat{n}_p^{[k,n]}\|$ es el módulo del vector de orientación del fotodiodo receptor.

A continuación, realizaremos un estudio de la componente de visión directa del canal en función de la distancia y en función de la frecuencia.

4.2.1. A. Canal LoS en función de la distancia

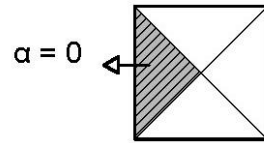
Queremos conocer la respuesta de la componente de visión directa del canal a lo largo del túnel. Para ello, analizaremos el comportamiento y la potencia recibida para cada una de las caras que componen el receptor planteado.

A. $\alpha = 0^\circ$

En primer lugar observaremos la variación que se produce en el canal si orientamos el receptor en dirección al transmisor. El receptor estará enganchado encima del casco del usuario, situación en la cual, estará expuesto a sufrir movimientos que modificarán su inclinación. Estas variaciones suponen una alteración de la dirección de apuntamiento del vector $\hat{n}_p^{[k,n]}$, ya que la inclinación del receptor está determinada por el ángulo θ . Por

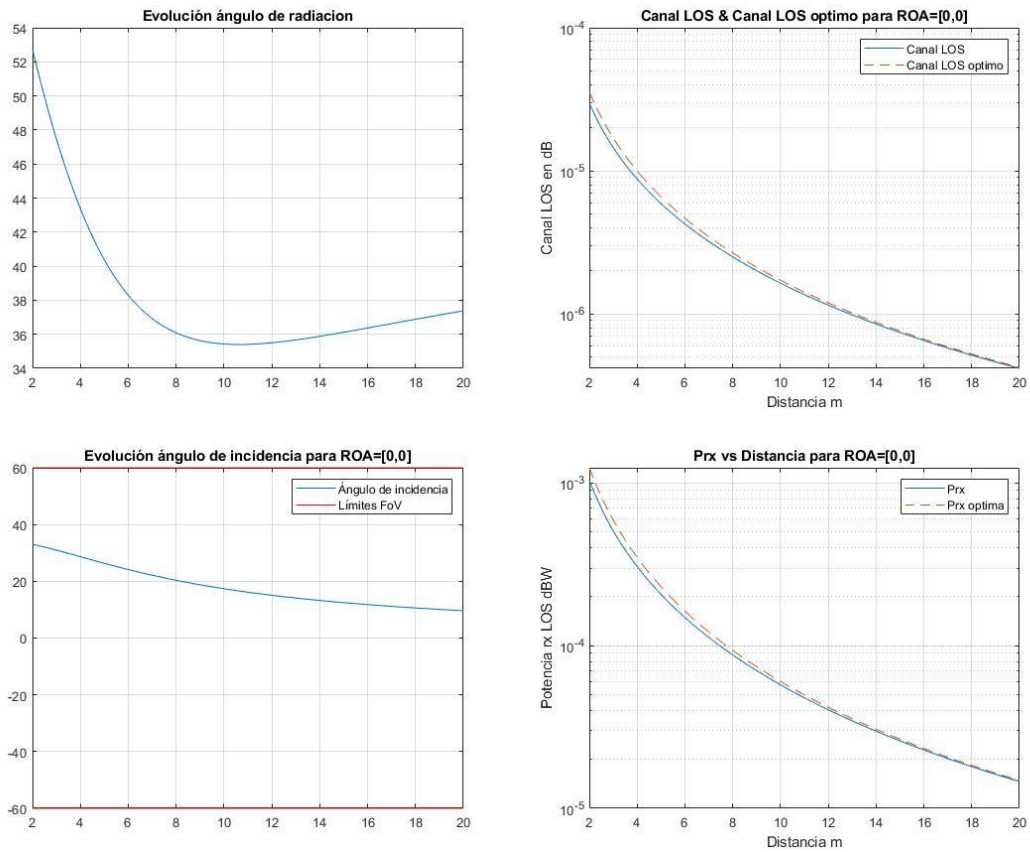
esta razón, necesitamos incluir en nuestro estudio las inclinaciones que mejor definan los mencionados movimientos.

Determinaremos entonces, dos orientaciones de estudio del ángulo θ , analizaremos la respuesta del canal para un ángulo de $\theta = 30^\circ$, y por otro lado, para $\theta = 60^\circ$. No obstante, con el fin de demostrar la valía de nuestro receptor, observaremos en primer lugar cómo se comporta nuestro canal si consideramos un receptor plano, situado en el plano xy .



A.1. $\theta = 0^\circ$

Comenzaremos el estudio considerando que el fotodiodo receptor se encuentra en el plano xy , es decir, el vector de orientación del fotodiodo no presenta ninguna inclinación frente al eje z .



Gráfica 4.1. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 0^\circ]$

En la primera gráfica podemos ver cómo va disminuyendo el ángulo de radiación a medida que el usuario avanza. Esta reducción se produce porque al trasladarse el usuario en dirección x^+ la distancia entre el vector \hat{n}_l y el receptor va disminuyendo. En la siguiente imagen se representa dicha evolución:

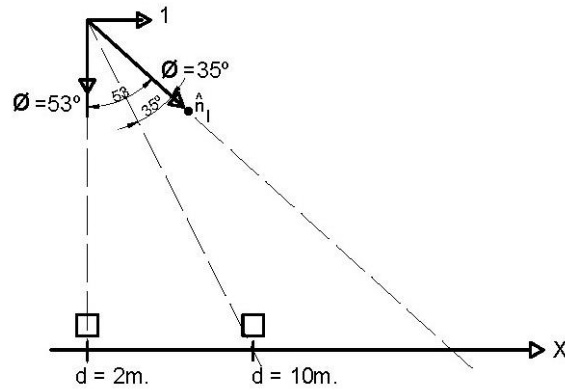


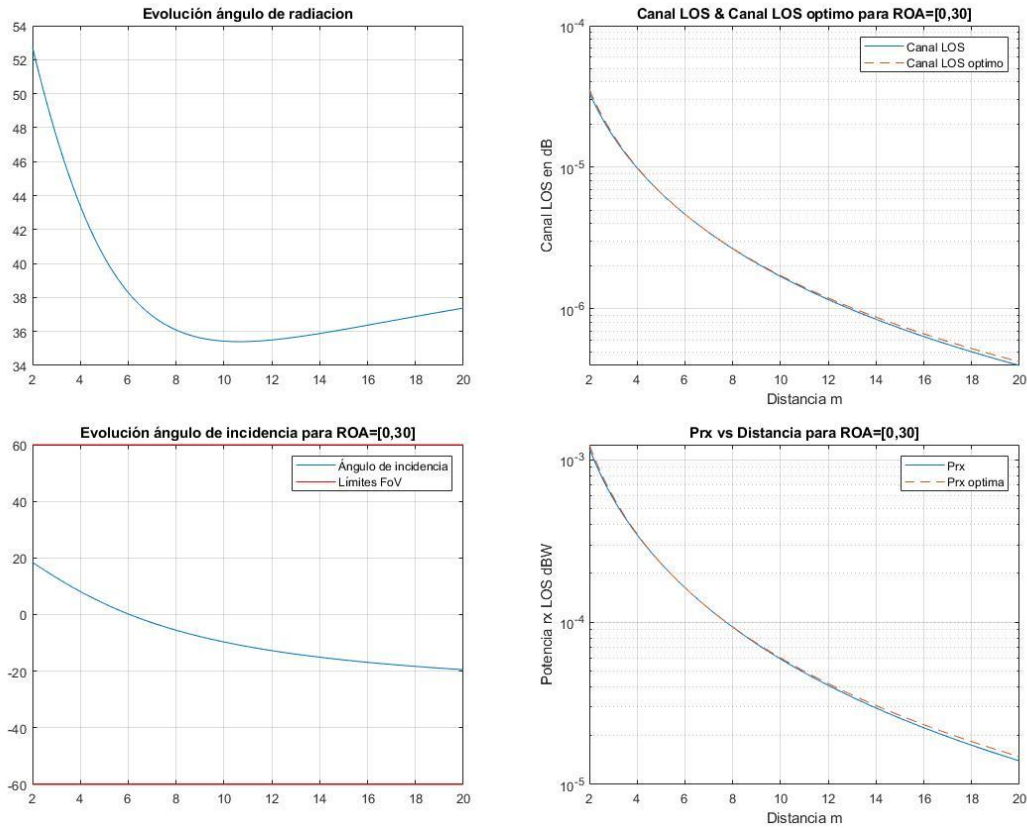
Figura 4.5. Evolución del ángulo de radiación a medida que el usuario avanza en dirección x^+

Con la orientación definida, si el usuario se encuentra cerca del transmisor, la amplitud del canal es adecuada. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia entre el par transmisor-receptor, la amplitud disminuye considerablemente. El ángulo de incidencia se encuentra dentro de límites del FoV, aunque se acerca al límite superior.

La potencia recibida, al igual que el canal, disminuye a medida que se distancia el receptor del transmisor. No obstante, se aproxima a los valores de potencia óptima. Aun así, al estar situado el fotodiodo en el plano xy , los valores de potencia recibidos a una distancia de 20 m son demasiado bajos. Nos surge la necesidad de elevar el fotodiodo con el propósito de intensificar los niveles de potencia recibida. Proponemos entonces, inclinar el fotodiodo a 30° y a 60° , contando con que dichas inclinaciones determinan los posibles movimientos que puede sufrir el fotodiodo al estar situado encima del casco de un usuario.

A.2. $\theta = 30^\circ$

En primer lugar definiremos el ángulo $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$. La respuesta del canal para esta situación es la siguiente:



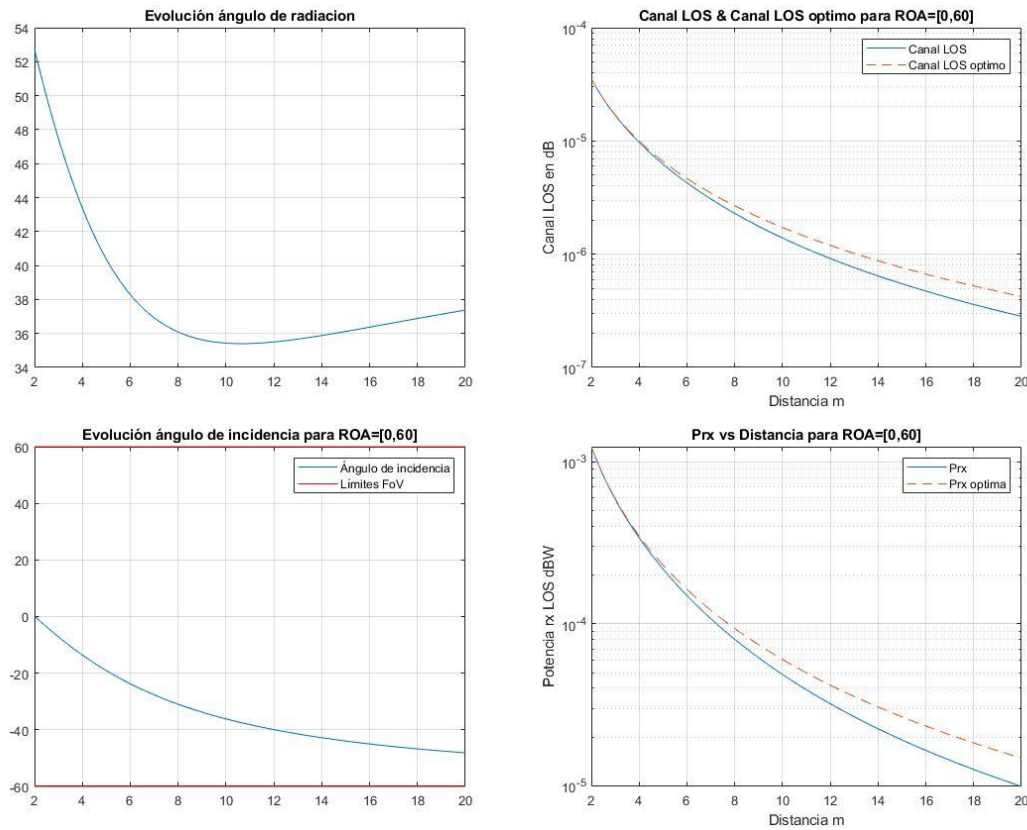
Gráfica 4.2. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$

El ángulo de radiación no ha sufrido ninguna variación, ya que no depende del ángulo ROA . Por tanto, para todos los casos de estudio tendrá una variación similar. Respecto a la respuesta del canal, apreciamos una mejoría considerable. En esta situación el comportamiento del canal es bastante similar al óptimo. Se debe a que el ángulo de incidencia ya no se encuentra tan cercano a los límites del FoV. Además, esta mejoría se refleja en el aumento del nivel de potencia recibida.

En comparación con el primer caso, comprobamos que al elevar el fotodiodo receptor mejora la respuesta de la componente de visión directa de nuestro canal.

A.3. $\theta = 60^\circ$

A continuación, analizaremos el comportamiento del canal para un ángulo $ROA = [0^\circ, 60^\circ]$. La respuesta del canal para esta situación se muestra en las siguientes gráficas:



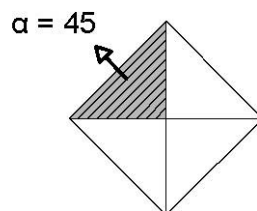
Gráfica 4.3. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [0^\circ, 60^\circ]$

Tal y como hemos comentado en el apartado anterior la evolución del ángulo de radiación no sufre alteraciones si varía el ángulo ROA , puesto que no depende de él. Sin embargo, observamos como la amplitud del canal sufre atenuación al inclinar el receptor 60° respecto al eje z . Esto ocurre porque el valor del ángulo de incidencia se acerca al límite inferior del campo de visión del transmisor. Al encontrarse cerca no recibe el mismo nivel de potencia como en el caso anterior, que estaba más centrado.

La gráfica donde hemos representado la potencia recibida refleja esta situación, a partir de 6 m vemos cómo el nivel de potencia disminuye exponencialmente frente al nivel óptimo. En la gráfica donde se representa la evolución del ángulo de incidencia, justo a 6 m , el ángulo se acerca exponencialmente al límite inferior del *Field of View*, justificando así la caída que sufre la potencia.

B. $\alpha = 45^\circ$

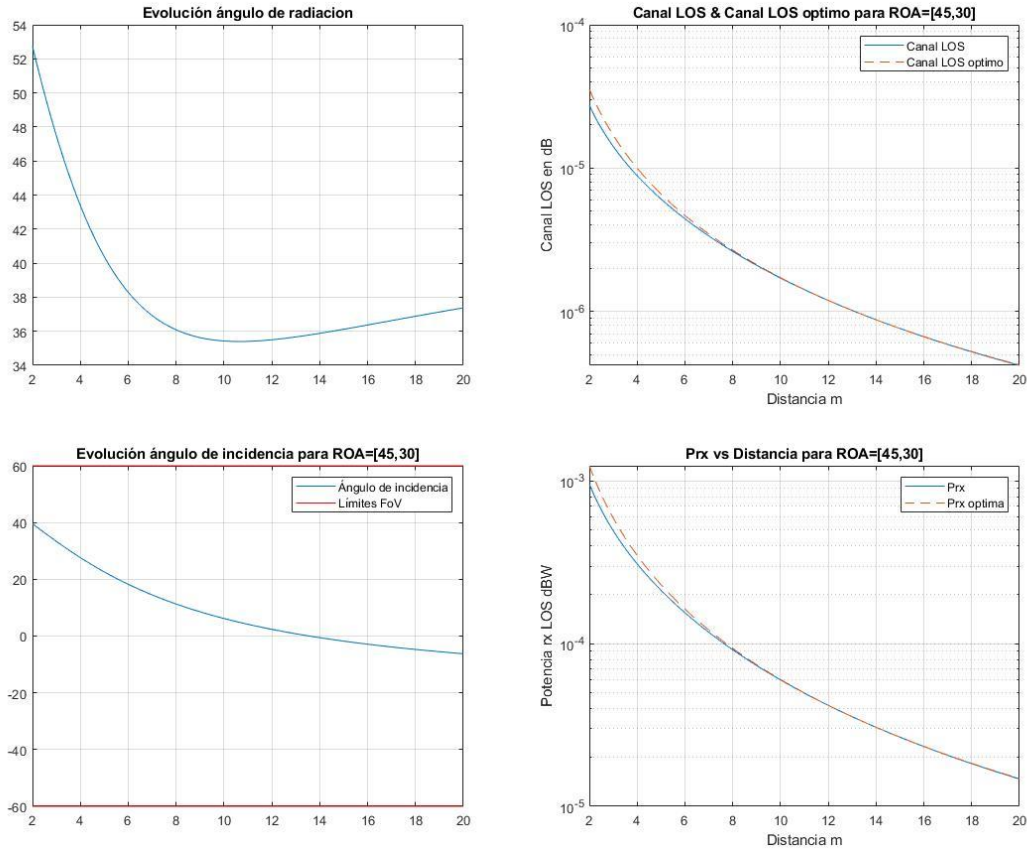
Si definimos el valor del ángulo $\alpha = 45^\circ$ el fotodiodo receptor se encuentra en orientado como se muestra a continuación:



En este caso, analizaremos la respuesta del canal para los ángulos $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$.

B.1. $\theta = 30^\circ$

En primer lugar, estudiamos el comportamiento de la componente de visión directa para un $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$

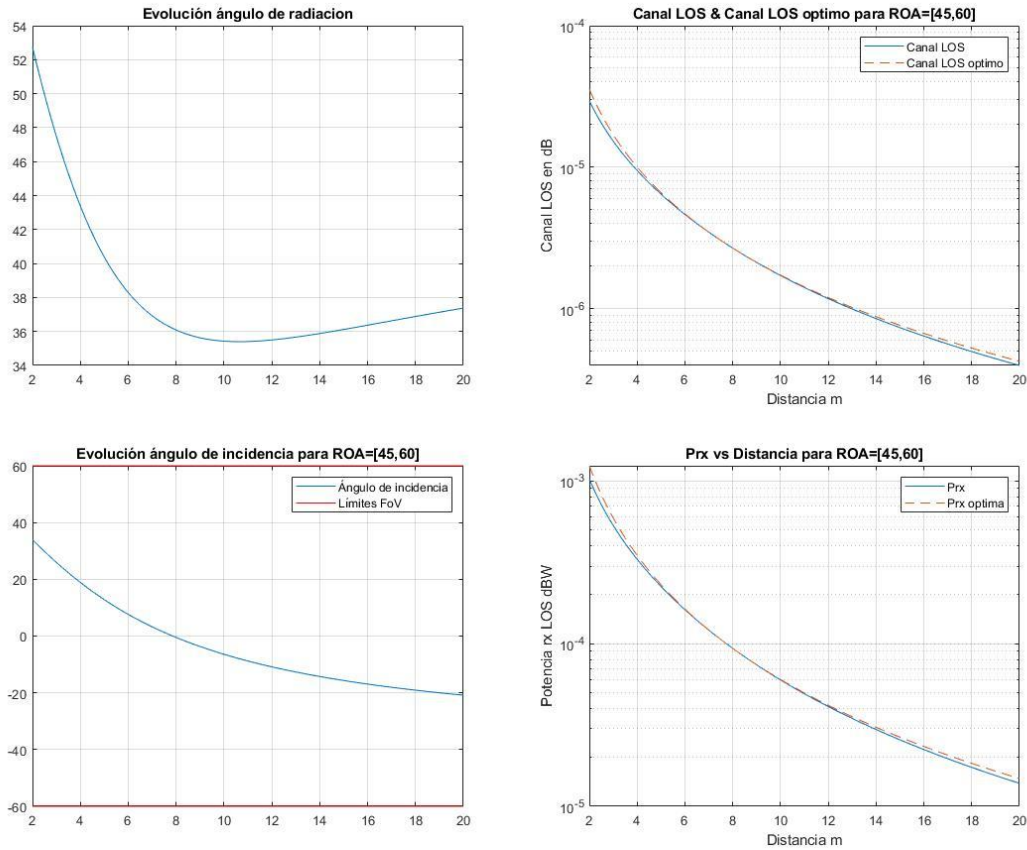


Gráfica 4.4. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$

En esta situación, al igual que para $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$, la respuesta del canal es muy próxima a la óptima ya que el ángulo de incidencia toma valores cercanos a 0° . Igualmente, la evolución de la potencia recibida a lo largo de la distancia se aproxima a los niveles óptimos.

B.2. $\theta = 60^\circ$

En segundo lugar, el comportamiento de la componente de visión directa para un $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$ es el siguiente:

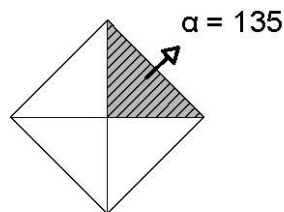


Gráfica 4.5. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$

Al igual que en el caso anterior, el canal es muy próximo al canal óptimo. Si nos fijamos, justo la amplitud del canal coincide con el óptimo a una distancia de 8 m donde, a su vez, el ángulo de incidencia toma valor 0° . Ocurre a la misma distancia de 8 m, la coincidencia del nivel de potencia recibido con su óptimo. Comprobamos así, que el comportamiento óptimo de nuestro canal se produce cuando el ángulo de incidencia es igual a 0° .

C. $\alpha = 135^\circ$

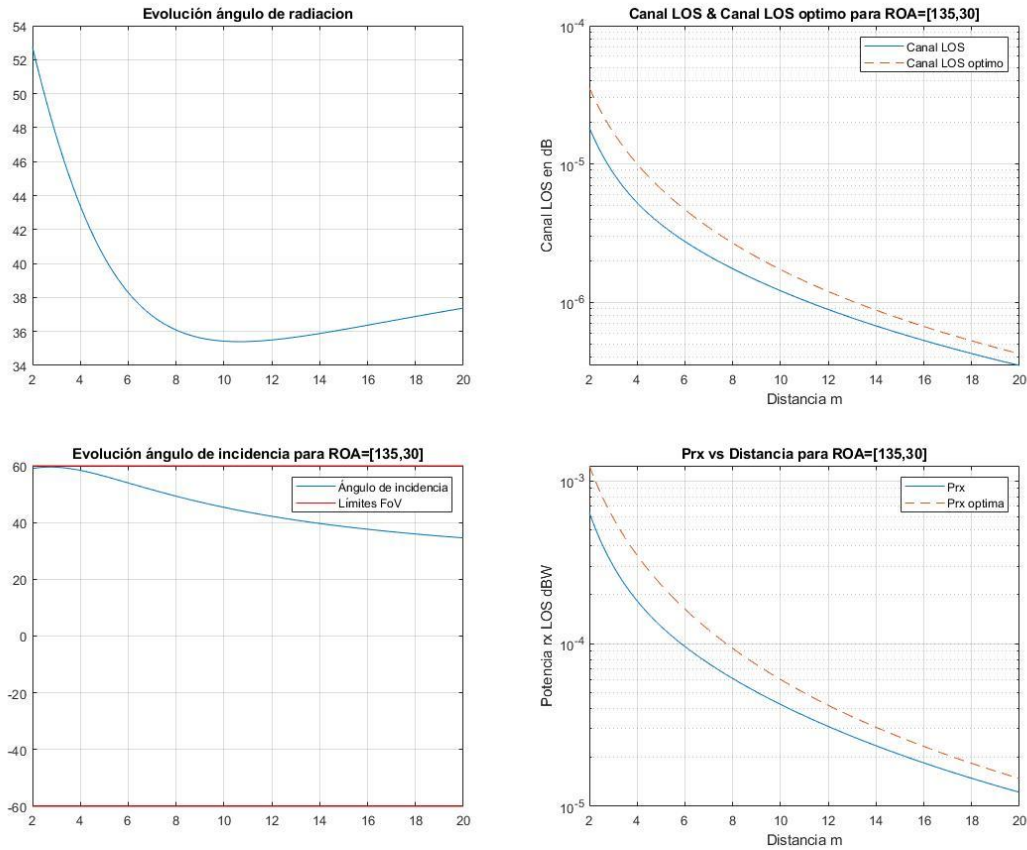
Si definimos el valor del ángulo $\alpha = 135^\circ$ el fotodiodo receptor se encuentra en orientado como se muestra a continuación:



En este caso, al igual que en los anteriores, realizaremos un análisis de la respuesta del canal para los ángulos $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$.

C.1. $\theta = 30^\circ$

Para un ángulo $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$, la respuesta del canal es la siguiente:



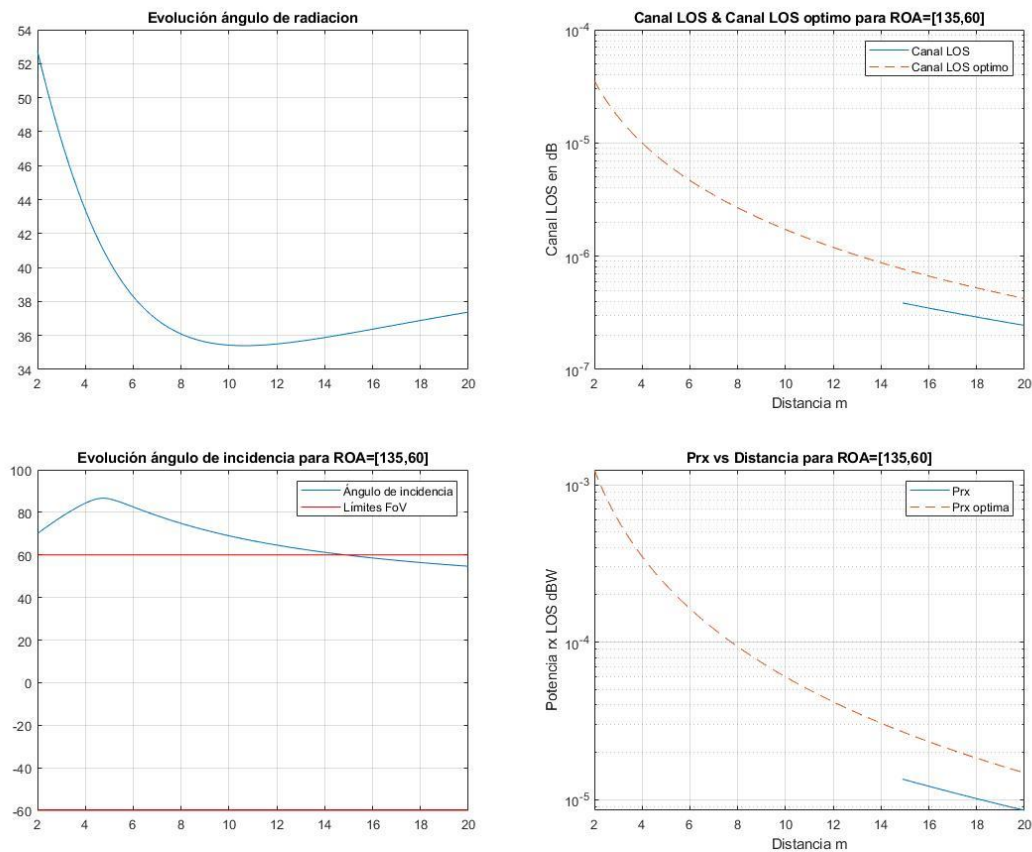
Gráfica 4.6. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$

En esta situación, el ángulo de incidencia se aproxima al límite superior del campo de visión, sobre todo si se encuentra el usuario cerca del transmisor. Por este motivo se aprecia una mayor atenuación de la amplitud del canal y del nivel de potencia a escasos metros de la luminaria LED. Si el usuario se aleja, vemos como el ángulo de incidencia se distancia del límite, y a su vez, la amplitud del canal y el nivel de potencia recibida se tienden más a la situación óptima. No obstante, al estar el ángulo de incidencia cerca del límite no se llegan a conseguir buenos niveles para la transmisión.

Cabe señalar cómo la posición del usuario receptor puede afectar a la respuesta del canal en esta situación. Al encontrarse el usuario pegado a la pared, con esta orientación nos encontramos en el fotodiodo receptor que apunta a la cercana pared, de ahí que el ángulo de incidencia se acerque a los límites del FoV y el canal sufra atenuaciones.

C.2. $\theta = 60^\circ$

Si aumentamos la inclinación del receptor, en este caso el ángulo $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$. A continuación analizaremos el resultado de dicha variación:



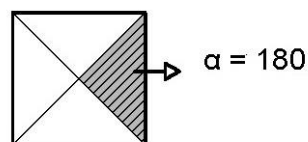
Gráfica 4.7. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$

En este caso, el ángulo de incidencia supera los límites del campo de visión. Esto quiere decir que hasta una distancia de 15 m aproximadamente, el valor de la amplitud del canal es igual a 0 y, por ende, la potencia recibida será nula. A partir de los 15 m, el ángulo de incidencia se encuentra dentro de los límites, sin embargo, al tener valores tan cercanos a 60° , los valores de la potencia y la respuesta del canal, aun dejando de ser nulos, no mejoran.

Por consiguiente, situar al receptor cerca de la pared, para esta orientación, se produce un corte de la comunicación hasta los 15 m. A partir de dicha distancia la calidad de la comunicación será demasiado baja.

D. $\alpha = 180^\circ$

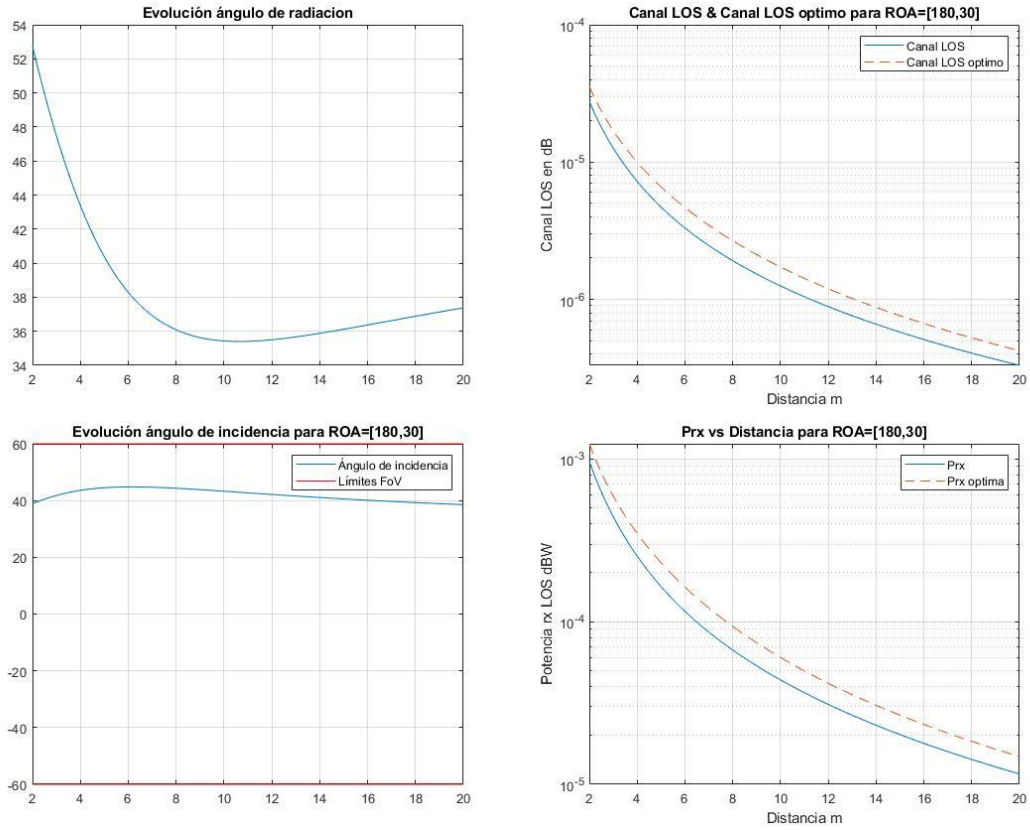
Si definimos el valor del ángulo $\alpha = 180^\circ$ el fotodiodo receptor se encuentra en orientado como se muestra a continuación:



En este caso, en la misma línea que los casos anteriores, realizaremos un análisis de la respuesta del canal para los ángulos $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$.

D.1. $\theta = 30^\circ$

Para un ángulo $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$, la respuesta del canal es la siguiente:

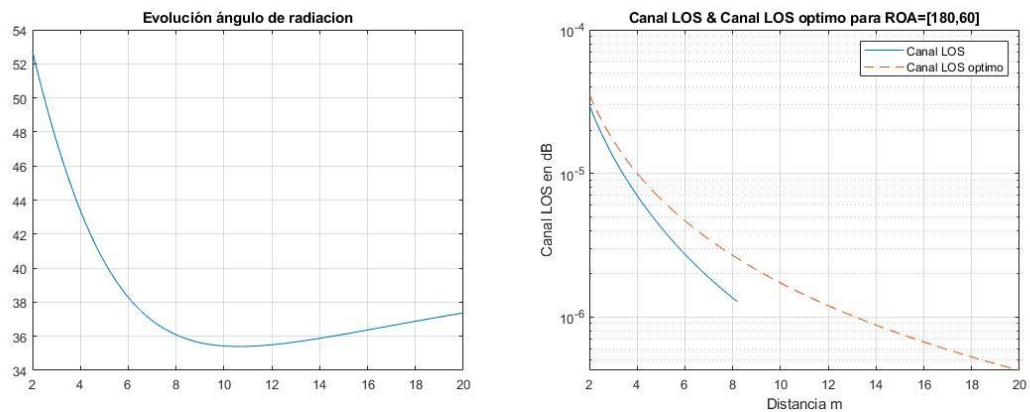


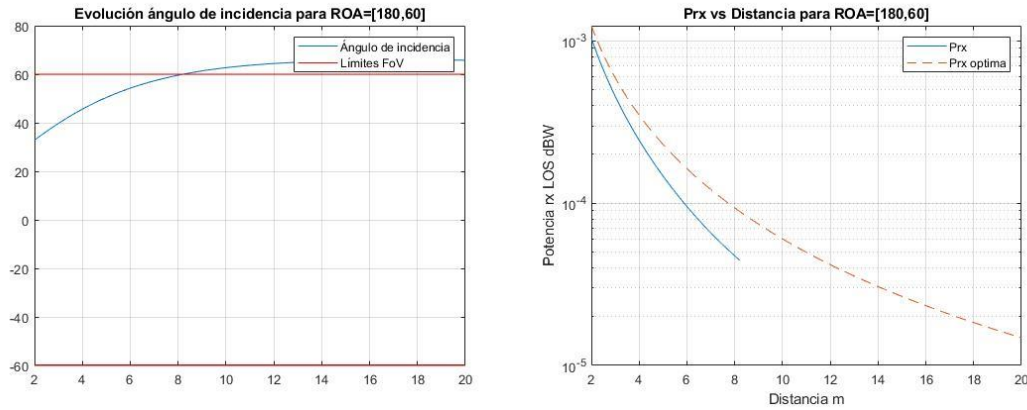
Gráfica 4.8. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$

Con esta orientación, la evolución del ángulo de incidencia tiende a acercarse al límite superior del campo de visión. Como resultado, los valores de canal y potencia se atenúan exponencialmente frente a los valores óptimos. Esta situación provoca una mala calidad de la señal transmitida.

D.2. $\theta = 60^\circ$

Si aumentamos la inclinación del ángulo ROA a 60° , la respuesta del sistema es la que sigue a continuación:



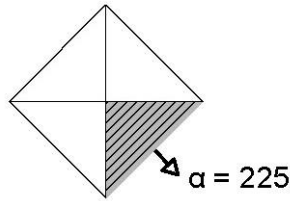


Gráfica 4.9. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$

Tras aumentar el ángulo de inclinación θ las condiciones empeoran. A partir de 8 m de distancia el ángulo de incidencia supera el límite del campo de visión. De ahí en adelante el canal tiene valores nulos y por consiguiente, la potencia recibida también es nula. No obstante, a distancias menores de 8 m el ángulo de incidencia se encuentra dentro de los límites pero, aun así, los niveles de potencia y de amplitud de canal son bajos.

E. $\alpha = 225^\circ$

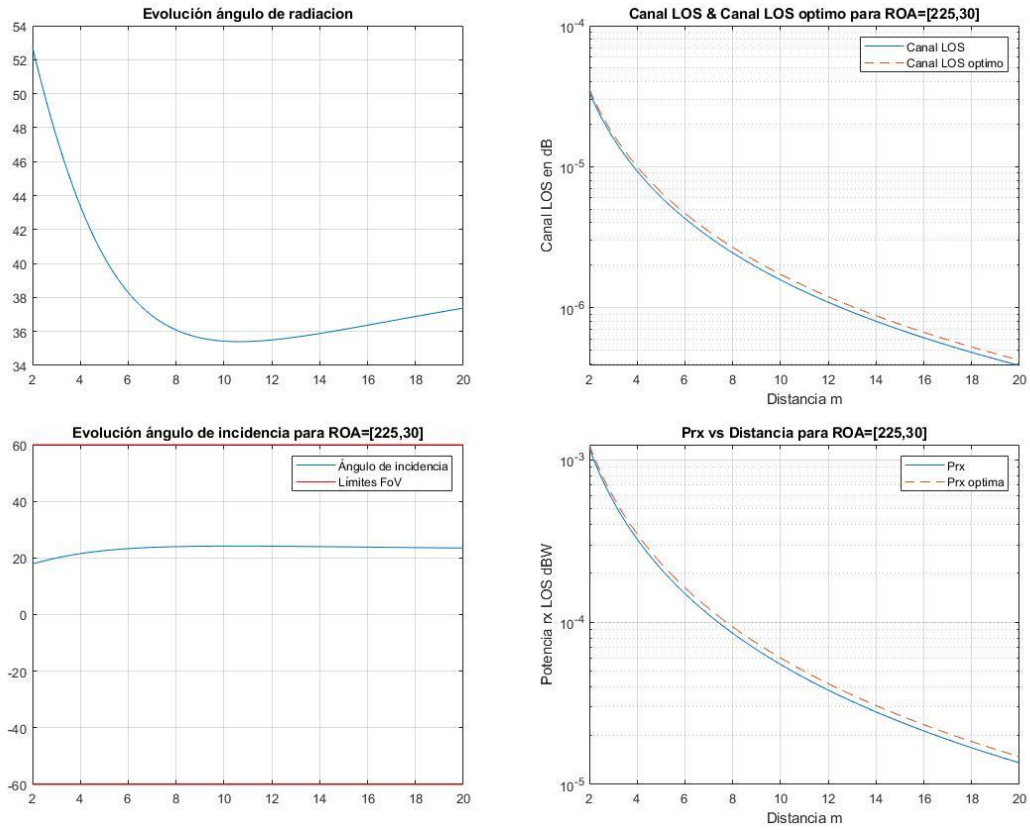
Si definimos el ángulo $\alpha = 225^\circ$ el fotodiodo receptor se encuentra en orientado tal y como se aprecia en la siguiente imagen:



En este caso, en la misma línea que los casos anteriores, realizaremos un análisis de la respuesta del canal para los ángulos $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [225^\circ, 60^\circ]$.

E.1. $\theta = 30^\circ$

Para un ángulo $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$ el canal planteado responde como sigue:

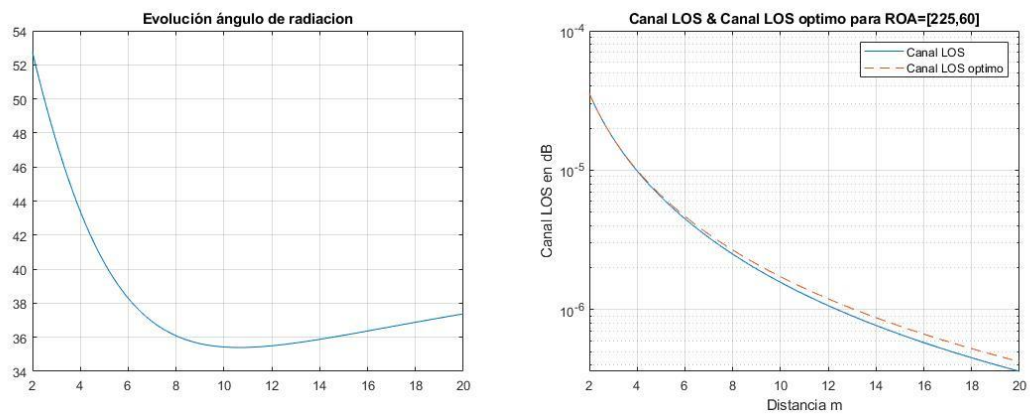


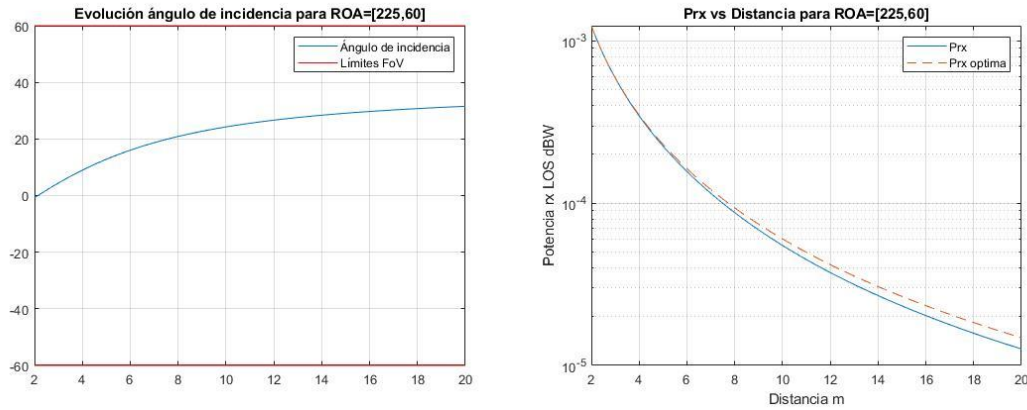
Gráfica 4.10. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$

Por simetría, la respuesta del canal para este apartado tendría que salir similar al caso de $ROA = [135, \theta]$, sin embargo, con esta orientación y al estar el usuario receptor pegado a la pared, el fotodiodo se encuentra dentro del campo de visión, tal y como se puede apreciar en la gráfica donde representamos la evolución del ángulo de incidencia. Al tener $\varphi_l^{[k]}$ valores cercanos a 0 la respuesta del canal es muy buena y, por ende, el nivel de potencia recibida también.

E.2. $\theta = 60^\circ$

Para un ángulo $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$ la respuesta de nuestro canal sería la siguiente:



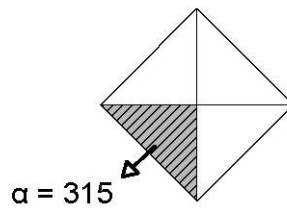


Gráfica 4.11. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [225^\circ, 60^\circ]$

Al igual que en el apartado anterior, la situación sigue siendo buena para establecer la comunicación entre el transmisor y receptor. La inclinación de 60° no afecta demasiado a los niveles de potencia y de canal.

F. $\alpha = 315^\circ$

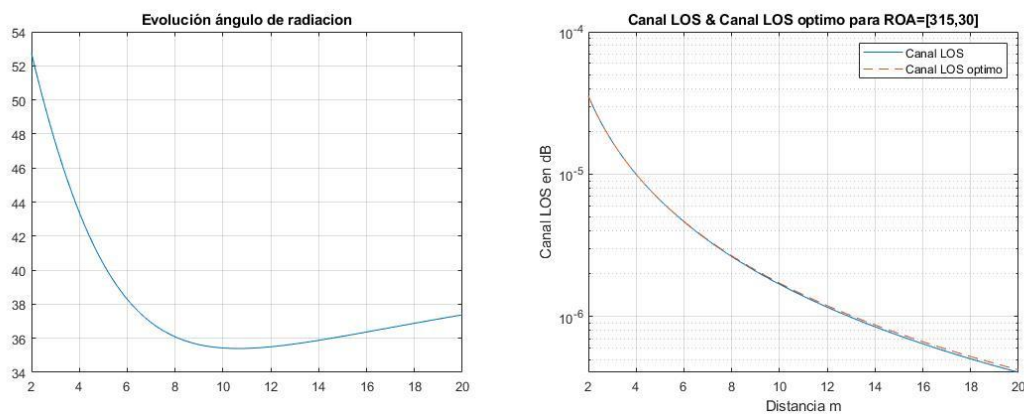
Si definimos el ángulo $\alpha = 315^\circ$ el fotodiodo receptor se encuentra en orientado tal y como se aprecia en la siguiente imagen:

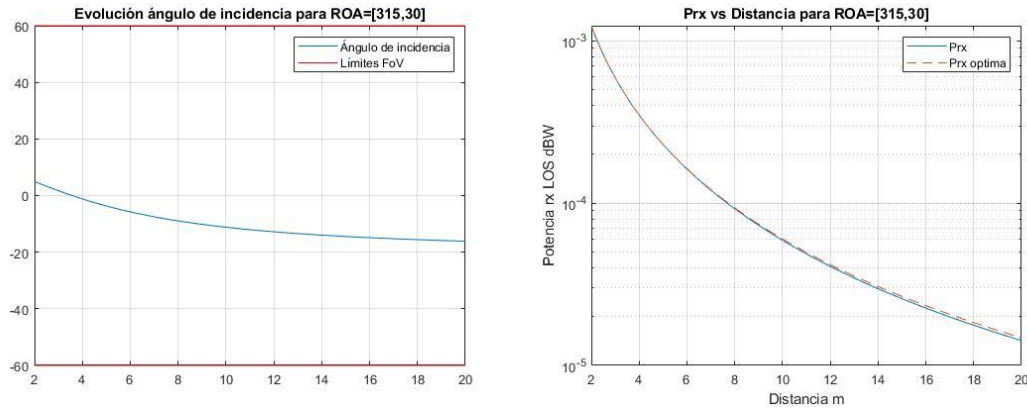


A continuación realizaremos un análisis, similar a los casos anteriores, de la respuesta del canal para los ángulos $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [315^\circ, 60^\circ]$.

F.1. $\theta = 30^\circ$

En este apartado, orientamos el receptor con un ángulo $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$. En esta situación, la componente de visión directa del canal planteado responde como tal y como se aprecia en las siguientes gráficas:





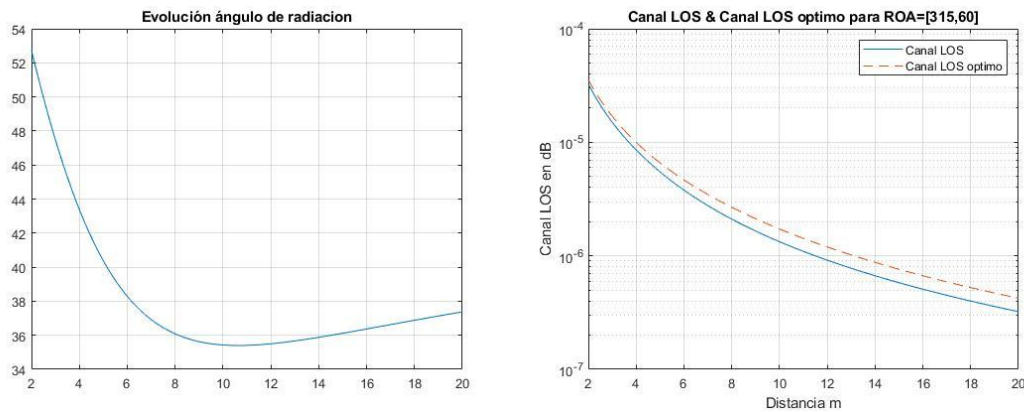
Gráfica 4.12. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$

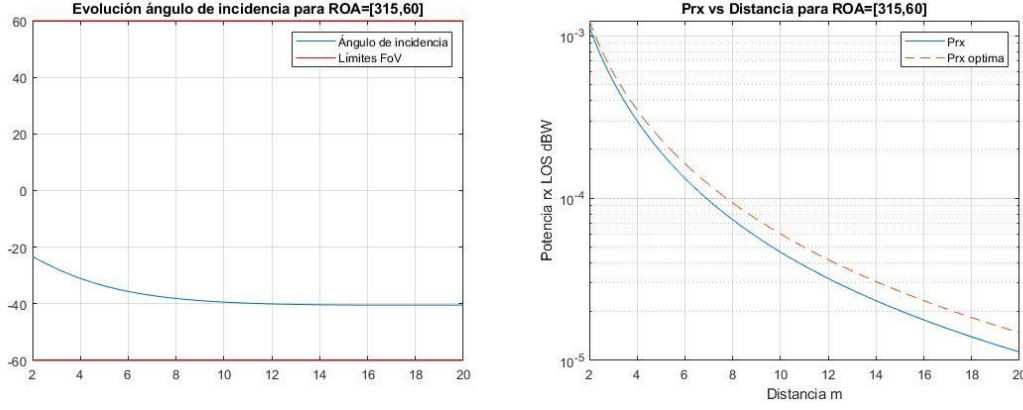
Debido a la simetría del receptor, en esta situación, la respuesta del canal es similar a la obtenida con una orientación de $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$. El ángulo de incidencia es igual a 0° a una distancia de 3,5 m aproximadamente y, tal y como se puede apreciar en las gráficas de la derecha, la amplitud de la componente directa del canal y la potencia recibida coinciden con sus valores óptimos en distancias muy cercanas al transmisor LED.

A medida que el usuario se aleja de la luminaria, el ángulo de incidencia tiende a disminuir suavemente su valor. Dicha tendencia se aprecia en el canal y en la potencia recibida en distancias cercanas a 16 m pero, al ser tan bajo el valor del ángulo de incidencia, las respuestas obtenidas no distan mucho de los valores óptimos.

F.2. $\theta = 60^\circ$

Si elevamos la inclinación del receptor a $\theta = 60^\circ$, la respuesta del canal es la siguiente:





Gráfica 4.13. Canal LoS en función de la distancia. $ROA = [315^\circ, 60^\circ]$

Teniendo en cuenta que la inclinación del ángulo θ es igual a 60° , el ángulo de incidencia $\varphi_l^{[k]}$ tiende a acercarse al límite inferior del FoV. Esta tendencia supone una atenuación de la amplitud del canal y de los niveles de potencia recibida a medida que el usuario se aleja ya que, en esta situación, cuanto más distancia exista entre el transmisor y receptor, menos potencia recibirá debido a las sombras que puedan darse.

4.2.1. B. Canal LoS en función de la frecuencia

Con el propósito de modelar la respuesta en frecuencia de la componente *Line-of-Sight* del canal es preciso obtener la componente en frecuencia correspondiente. Para ello, la respuesta en frecuencia se modela como referenciamos en el [capítulo 3.3.](#):

$$h_{F-E}(f) = e^{-\frac{f}{1.44f_m}}$$

Evaluaremos la respuesta del canal en un rango de frecuencias comprendido entre $f \in [1 \text{ MHz}, 20 \text{ MHz}]$ donde, el ancho de banda del transmisor LED a -3 dB corresponde a $f_m = 30 \text{ MHz}$.

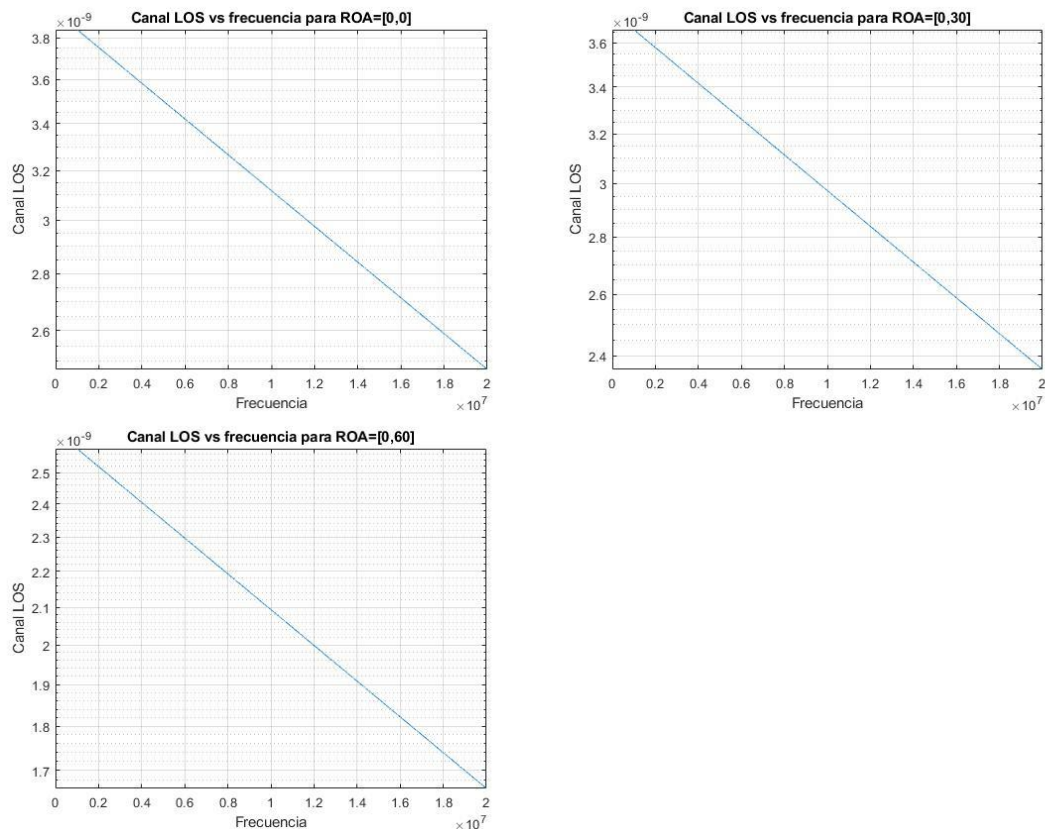
El análisis de la respuesta en frecuencia lo realizaremos para las mismas orientaciones planteadas en el apartado anterior, con el fin de obtener una caracterización completa de nuestro canal.

A. $\alpha = 0^\circ$

En primer lugar, comenzaremos analizando la respuesta en frecuencia que resulta tras orientar el fotodiodo hacia el transmisor. Al igual que en el apartado anterior, estudiaremos la influencia del ángulo de inclinación θ en nuestro sistema.

A.1. $\theta = 0^\circ, \theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

Comenzaremos observando el comportamiento de la componente en frecuencia situando el receptor en el plano xy , es decir, $\theta = 0^\circ$. Después, elevaremos el fotodiodo receptor un ángulo de $\theta = 30^\circ$ y a continuación, a $\theta = 60^\circ$.



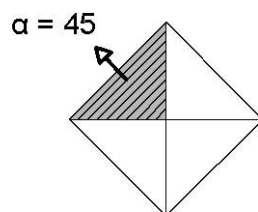
Gráfica 4.14. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [0^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ\}$

Comparando las tres situaciones representadas observamos que, a bajas frecuencias, a medida que el receptor se eleva disminuye la amplitud de la respuesta en frecuencia de nuestro canal. A su vez, cabe destacar la pendiente negativa que se produce en ambas situaciones, a medida que aumenta el ancho de banda, es decir, la frecuencia de trabajo, el canal LoS empeora. Por este motivo, confirmamos que nuestro sistema es más eficiente si se trabaja a frecuencias más bajas. Además, se aprecia un *offset* de continua

B. $\alpha = 45^\circ$

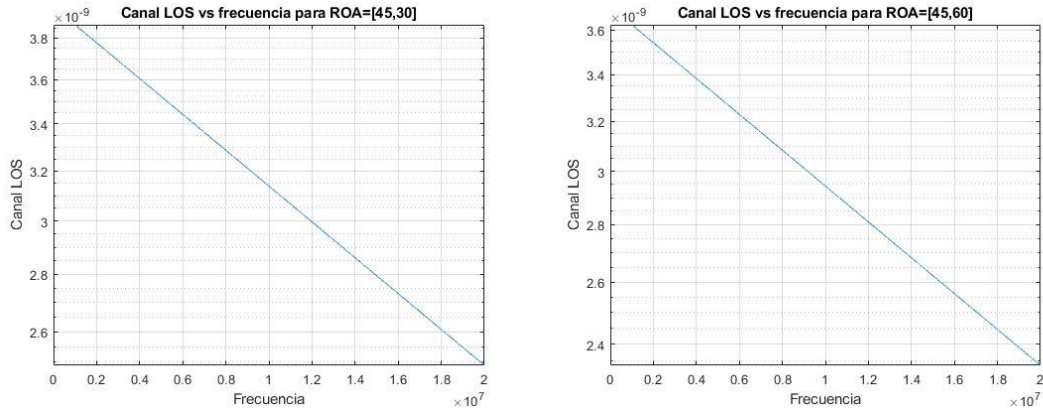
En segundo lugar, analizaremos la respuesta en frecuencia de la componente de visión directa de nuestro canal para un ángulo $ROA = [45^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma los siguientes valores, $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$.

Recordemos, que en esta situación el receptor se encuentra orientado tal y como se apreciaba en la siguiente gráfica.



B.1. $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

La respuesta en frecuencia del canal para las inclinaciones de $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$, en esta situación, se muestran a continuación.



Gráfica 4.15. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [45^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

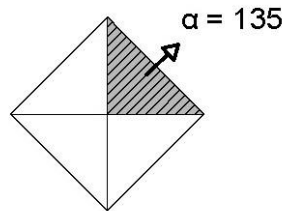
Observamos que la tendencia negativa no varía, al ser una propiedad de nuestro sistema de transmisión, para todos los casos la respuesta en frecuencia tendrá la misma pendiente.

Como vimos en el apartado anterior, con esta orientación la calidad de la transmisión es buena y, las amplitudes del canal tienen un comportamiento similar al de la orientación anterior.

C. $\alpha = 135^\circ$

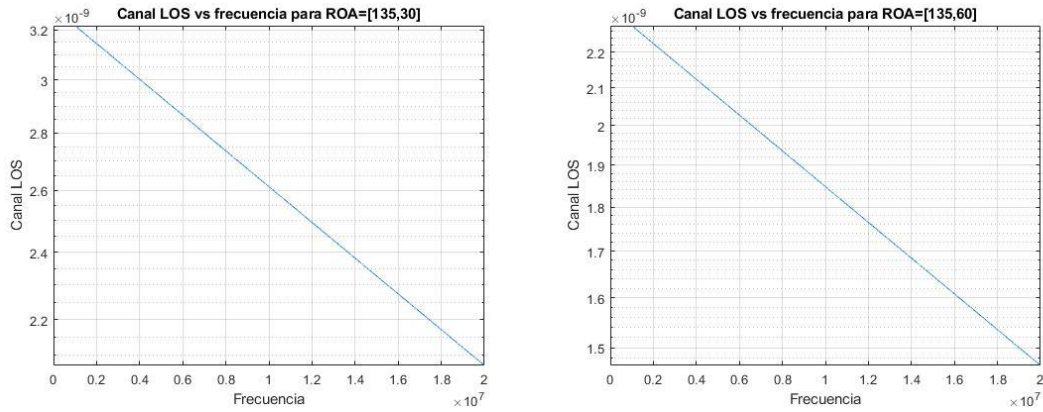
En tercer lugar, estudiaremos la respuesta en frecuencia de la componente LoS de nuestro canal para un ángulo $ROA = [135^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma como valores los siguientes, $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$.

Recordemos que, en esta situación, el receptor se encuentra orientado tal y como se representa en la siguiente imagen.



C.1. $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

La respuesta en frecuencia de la componente del canal para las inclinaciones de $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$ se muestran a continuación.



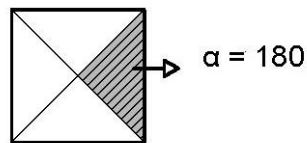
Gráfica 4.16. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [135^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

En vista de los resultados obtenidos, frente a los casos anteriores, apreciamos una leve atenuación de la amplitud de la respuesta en frecuencia. Este comportamiento se justifica en el apartado donde caracterizamos el canal en función de la distancia, donde concluimos que, con esta orientación, la atenuación de la amplitud es la consecuencia que sufre nuestro canal cuando el ángulo de incidencia tiende a acercarse a los límites del campo de visión. De ahí que, la componente en frecuencia también refleje dicha disminución de la amplitud.

D. $\alpha = 180^\circ$

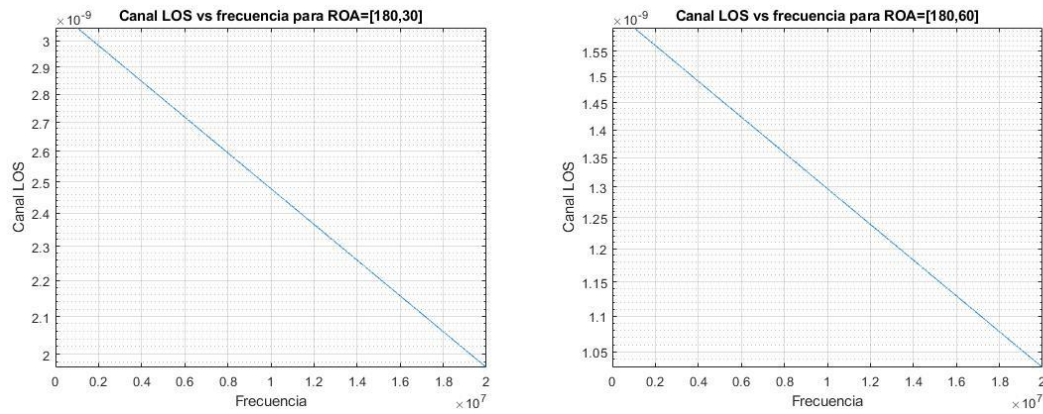
En cuarto lugar, analizaremos la respuesta en frecuencia de la componente LoS de nuestro canal para un ángulo $ROA = [180^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma como valores los siguientes, $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$.

Recordemos que, en esta situación, el receptor se encuentra orientado tal y como se representa en la siguiente imagen.



D.1. $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

A continuación mostraremos las respuestas en frecuencia de la componente LOS de nuestro canal que resultan tras inclinar el receptor 30° y 60° .



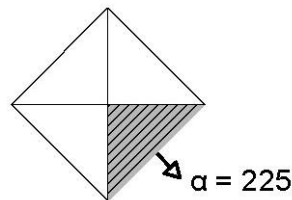
Gráfica 4.17. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [180^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

Las atenuaciones que hemos apreciado en la representación del canal LoS en función de la distancia quedan reflejadas al representar el canal en función de la frecuencia, pues la amplitud es menor. Sobre todo, para el ángulo $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$, se nota una atenuación considerable en la amplitud, recordemos que para este caso se producían cortes en la transmisión a partir de 10 m.

E. $\alpha = 225^\circ$

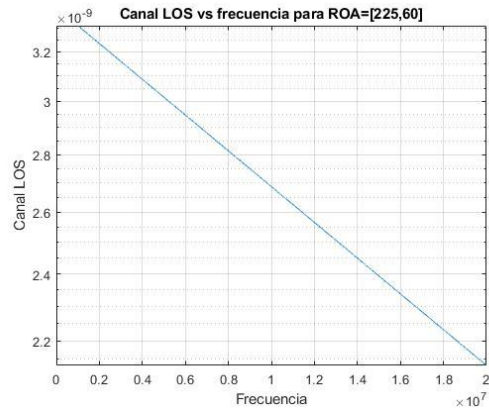
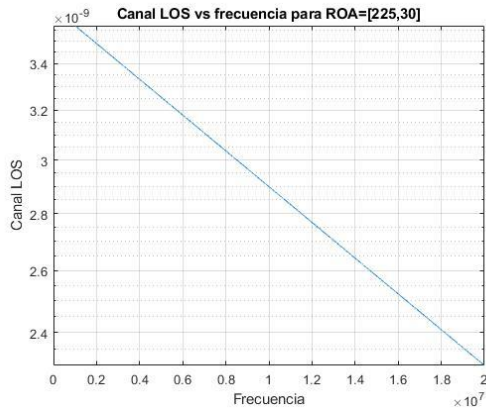
En este apartado, observaremos la respuesta en frecuencia de la componente LoS de nuestro canal para un ángulo $ROA = [225^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma como valores los siguientes, $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$.

Recordemos que, en esta situación, el receptor se encuentra orientado tal y como se representa en la siguiente imagen.



E.1. $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

A continuación mostraremos las respuestas en frecuencia del canal LoS que resultan tras inclinar el receptor 30° y 60° .



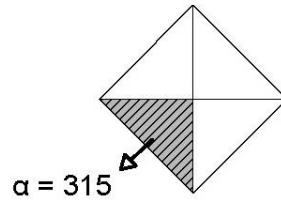
Gráfica 4.18. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [225^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

En el apartado anterior, para esta situación, vimos que el canal tenía una amplitud similar al caso óptimo. Esta condición se ve representada en esta situación, al representarlo en frecuencia, donde obtenemos buen nivel de canal.

F. $\alpha = 315^\circ$

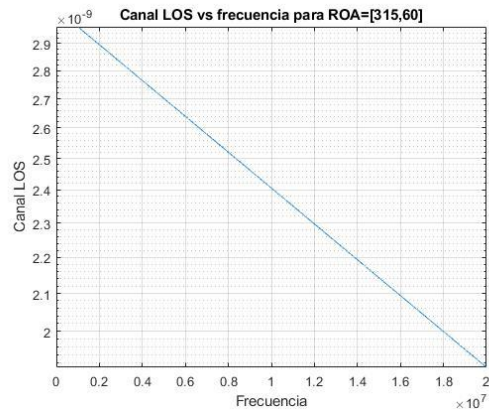
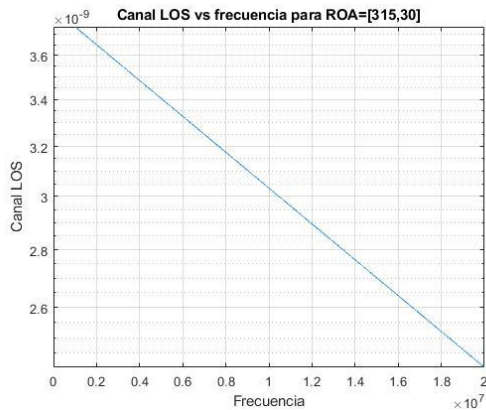
Por último, analizaremos cómo responde el canal LoS en función de la frecuencia para un ángulo $ROA = [315^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma como valores los siguientes, $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$.

Recordemos que, en esta situación, el receptor se encuentra orientado tal y como se representa en la siguiente imagen.



F.1. $\theta = 30^\circ, \theta = 60^\circ$

A continuación mostraremos las respuestas en frecuencia del canal LoS que resultan tras inclinar el receptor 30° y 60° .



Gráfica 4.19. Canal LoS en función de la frecuencia. $ROA = [315^\circ, \theta]$.
Donde $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

En esta situación, por simetría, nos encontramos con una respuesta similar a la obtenida con un $ROA = [45^\circ, 0]$. Sin embargo, para $\alpha = 315^\circ$, si se inclina el receptor 60° , la amplitud del canal sufre una leve atenuación. Esta disminución se justifica con la representación del canal en función de la distancia, donde apreciamos una leve atenuación cuando el usuario se aleja del receptor, ya que el ángulo de incidencia tiende a acercarse al FoV.

4.2.2. Caracterización del canal NLoS

El canal resultante de la reflexión producida en las paredes, también conocido como *Non Line-of-Sight* (NLoS), se caracteriza por el semiángulo transmisor $\phi_{1/2} = 70^\circ$ y la distancia que recorre el rayo NLoS, la cual se divide en dos trayectos, tal y como se representa en la siguiente figura.

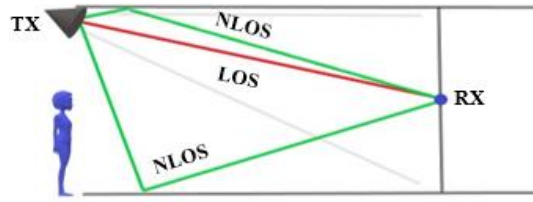


Figura 4.6. Escenario en 2D

Con el fin de modelar la respuesta en frecuencia de la componente NLoS, es preciso definir la diferencia de retardos entre las componentes LoS y NLoS de la siguiente forma:

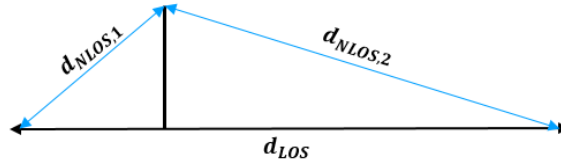


Figura 4.7. Recorrido componente NLoS

En primer lugar, definimos el retardo que sufre la componente NLoS:

$$\tau_{NLOS} = \frac{(d_{NLOS,1} + d_{NLOS,2})}{c} = \frac{(5.32 \text{ m} + 18.19 \text{ m})}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 78.36 \text{ ns} \quad (26)$$

En segundo lugar, el retardo que sufre la componente LoS:

$$\tau_{LOS} = \frac{d_{LOS}}{c} = \frac{20 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 66.67 \text{ ns} \quad (27)$$

Por último, se calcula la diferencia de retardos entre las distintas componentes:

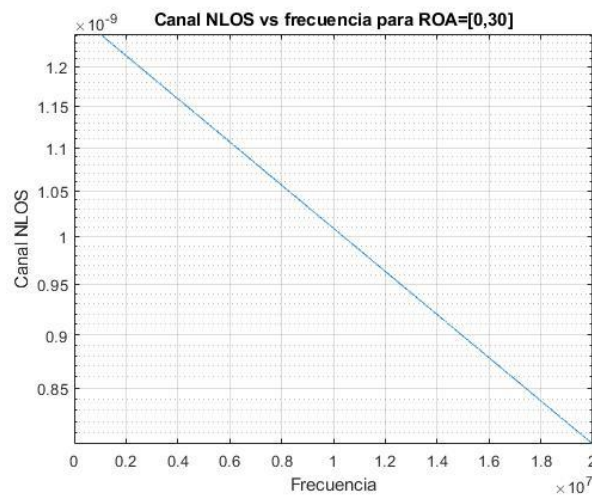
$$\Delta T = \tau_{NLOS} - \tau_{LOS} = 11.69 \text{ ns} \quad (28)$$

Para nuestro sistema de comunicaciones consideramos que un retardo de 11.69 ns no llega a deteriorar la comunicación entre el par transmisor-receptor, por tanto podemos suponer que la aportación de la componente NLoS mejorará las condiciones de transmisión del canal.

A continuación realizaremos la simulación de la componente NLoS considerando que las paredes que confinan el túnel son de hormigón, por tanto el índice de reflexión es de 0.4 [40].

4.2.2. A. Canal NLoS en función de la frecuencia

Para la simulación de la componente NLoS en función de la frecuencia que realizamos en este apartado se considera que el fotodiodo receptor se encuentra orientado con un ángulo $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$. Es necesario destacar que dicha componente contiene valores reales e imaginarios, por ello, representamos el módulo del canal en la gráfica que sigue a continuación:



Gráfica 4.20. Canal NLoS en función de la frecuencia $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$

En este caso, el máximo de la componente en frecuencia corresponde con la componente h_{LOS} del canal, ya que dicha componente no depende de la frecuencia de modulación. A su vez, cabe destacar que, para el resto de orientaciones podemos esperar un comportamiento similar. Debido a la caída negativa que sufre la componente en frecuencia, este modelo restringe bastante el ancho de banda disponible, tal y como se describe en la Figura 4.9.

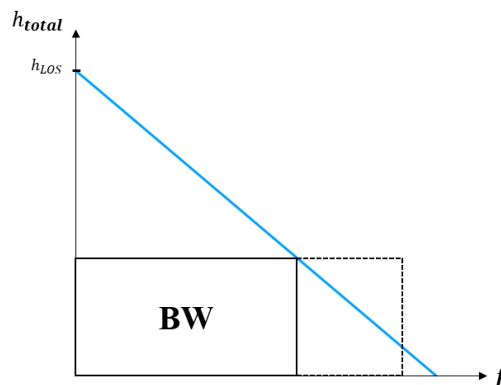


Figura 4.8. Respuesta en frecuencia de la componente NLoS

5. SIMULACIONES

En este apartado realizaremos simulaciones para evaluar la tasa de error SER, *Symbol Error Rate*. Estas simulaciones son claves para evaluar los sistemas de transmisión de datos en sistemas de punto a punto. En dicha valoración se tiene en cuenta la aportación del transmisor, receptor y del medio por el que se propaga la luz.

Para ello, cada canal trabajará con un único fotodiodo como receptor. En el canal no aplicaremos ningún tipo de codificación, tal y como se ha mencionado en el apartado anterior. Además, evaluaremos nuestro sistema para distintas modulaciones PAM, en concreto para 2-PAM, 4-PAM, 8-PAM. En el escenario planteado, que se muestra a continuación, el transmisor se sitúa en la *posición* = $\{0\text{ m}, 5\text{ m}, 5\text{ m}\}$, transmitiendo con un semiángulo de radiación $\phi_{1/2} = 60^\circ$. El usuario receptor tendrá una altura de 0.85 m. El área de detección de cada fotodiodo receptor es de 1 cm^2 . Enviamos tramas de 1000 *simbolos*, transmitiendo con un ancho de banda de 20 MHz. Analizaremos la potencia que recibe el usuario en función de la distancia en la que se sitúa y de la orientación del fotodiodo receptor.

El objetivo de dicho análisis es motivar el uso del receptor piramidal propuesto. Dicho receptor ofrece la posibilidad de variar la dirección de apuntamiento de los fotodiodos que lo componen. De esta manera, si alguna de las caras del receptor piramidal no se encuentra en visión directa con el transmisor no se producirá un corte de la transmisión, ya que otras caras de la pirámide receptora sí que estarán apuntando al transmisor.

En nuestro estudio le daremos mayor prioridad de análisis a la componente LoS del canal propuesto. Es necesario aplicar énfasis en la observación de dicha componente ya que es la más propensa a sufrir cortes de transmisión debido a los posibles puntos ciegos que se puedan dar en el sistema, como las limitaciones del *Field of View*. En este contexto, debido a la reflexión de luz producida en las paredes del túnel, la componente NLoS aportará ganancia de diversidad, ofreciendo cobertura a los puntos ciegos.

En un primer caso (A), estudiaremos el comportamiento del canal en caso de que el usuario se encuentre a una distancia x fija. En un segundo caso (B), el receptor variará la distancia con el transmisor de forma aleatoria. La finalidad de distinguir estas dos situaciones reside en destacar las distintas condiciones que se pueden dar a la hora de instalar nuestro sistema en un túnel en construcción. Dado que el túnel se encuentra en plena construcción, el frente de onda no será fijo. De ahí que sea necesario analizar la comunicación si el usuario se sitúa en una posición fija o, por el contrario, aleatoria. A continuación, analizaremos más en detalle cada caso.

Pretendemos que este apartado sirva de manual de referencia, de cara a probarlo en un sistema real a pie de campo.

5.A. USUARIO FIJO

En este apartado se evaluará la comunicación entre el par transmisor-receptor considerando que el receptor se encuentra a una distancia x fija. Además, se tendrá en cuenta el posible desplazamiento del receptor a lo ancho del túnel, por este motivo, la coordenada y toma valores aleatorios dentro del rango $y \in [0,10]\text{ m}$. Entonces, la definición de las posiciones del transmisor y receptor son las siguientes:

Transmisor LED: posición = $[0\text{ m}, 5\text{ m}, 5\text{ m}]$

Usuario receptor: posición = $[x, y, z]$

Donde $x \in \{5\text{ m}, 10\text{ m}, 15\text{ m}, 20\text{ m}, 25\text{ m}, 30\text{ m}\}$, $y \in [0, 10]$, $z = 0.85\text{ m}$

Cada fotodiodo receptor forma una cara de la pirámide. La base de ésta se enganchará al casco del usuario o en la maquinaria. Cada cara de la pirámide se definirá con una orientación determinada, con el ya mencionado ROA, tal y como se muestra en la Figura 5.1.

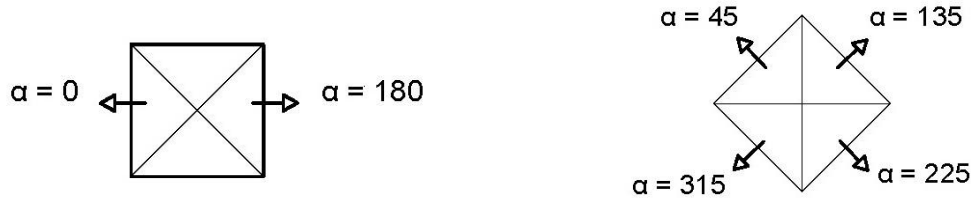
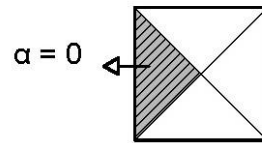


Figura 5.1. Orientaciones del receptor.

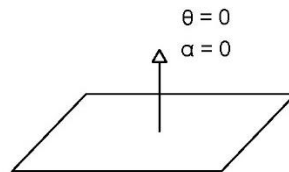
A. $\alpha = 0^\circ$

La pirámide foto-receptora, en este caso, apunta al transmisor tal y como se muestra en la siguiente imagen:

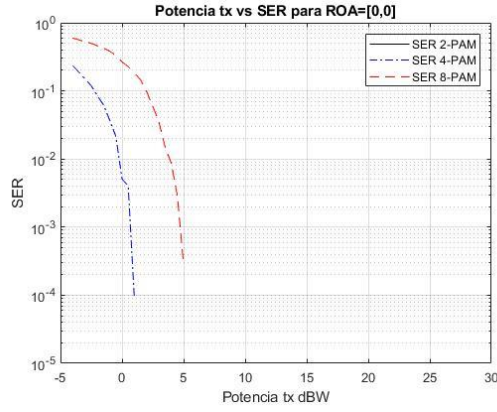


A.1. $\theta = 0^\circ$

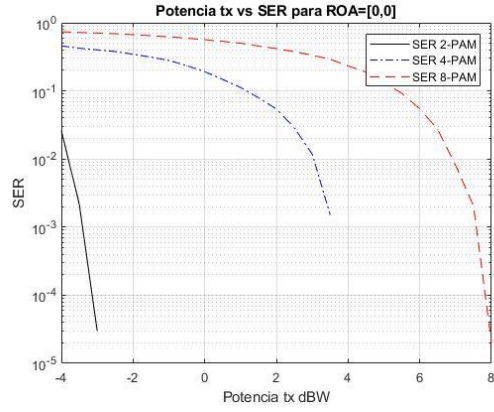
En primer lugar, asumimos un fotodiodo plano. En este caso, el ángulo α no varía la orientación. Por tanto, el fotodiodo no presenta ninguna inclinación frente al eje z , sino que se encuentra situado en el plano xy .



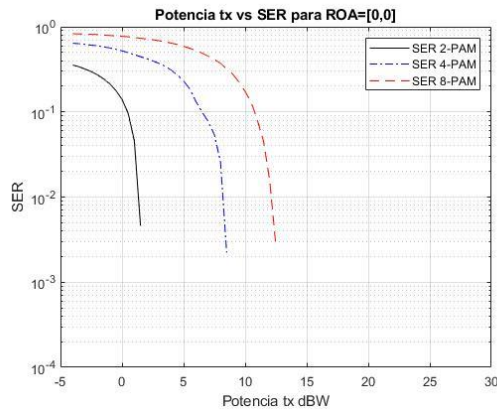
La tasa de error, en esta situación, se aprecia en las siguientes gráficas.



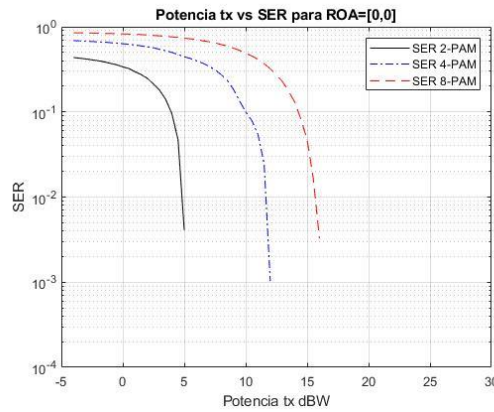
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 m$



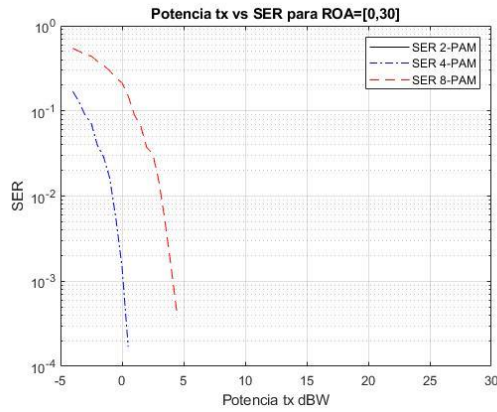
$x = 30 m$

Gráfica 5. A.1. $\alpha = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$. Canal LoS

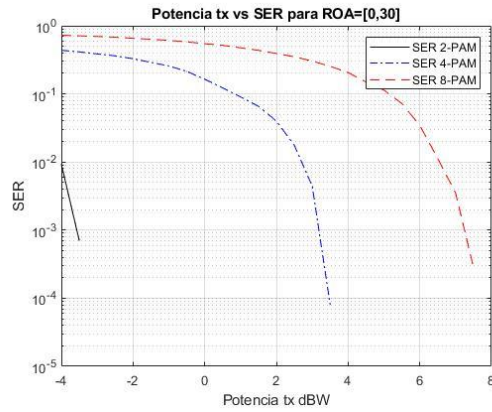
Si el receptor se encuentra cerca de la luminaria LED, apreciamos en la primera gráfica una tasa de errores SER es buena, para la modulación 2 – PAM la tasa de error es 0, y para las modulaciones 4 – PAM y 8 – PAM, tienen errores del orden de 10^{-3} . En un sistema óptico sin codificar, si los valores obtenidos de la tasa de error SER son menores a 10^{-2} , tras la codificación tienden a 0 [42].

A.2. $\theta = 30^\circ$

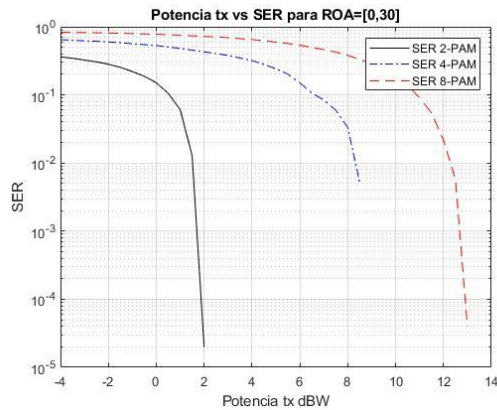
Como hemos explicado anteriormente, al colocar el receptor en el casco, no podemos considerar la opción de trabajar con un fotodiodo plano, de ahí que consideremos la inclinación de $\theta = 30^\circ$



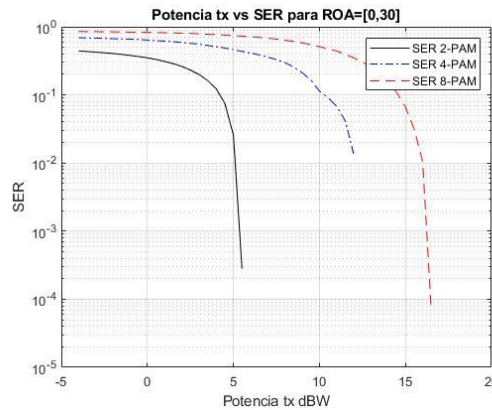
$x = 5 \text{ m}$



$x = 10 \text{ m}$



$x = 20 \text{ m}$



$x = 30 \text{ m}$

Gráfica 5. A.2. $\alpha = 0^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

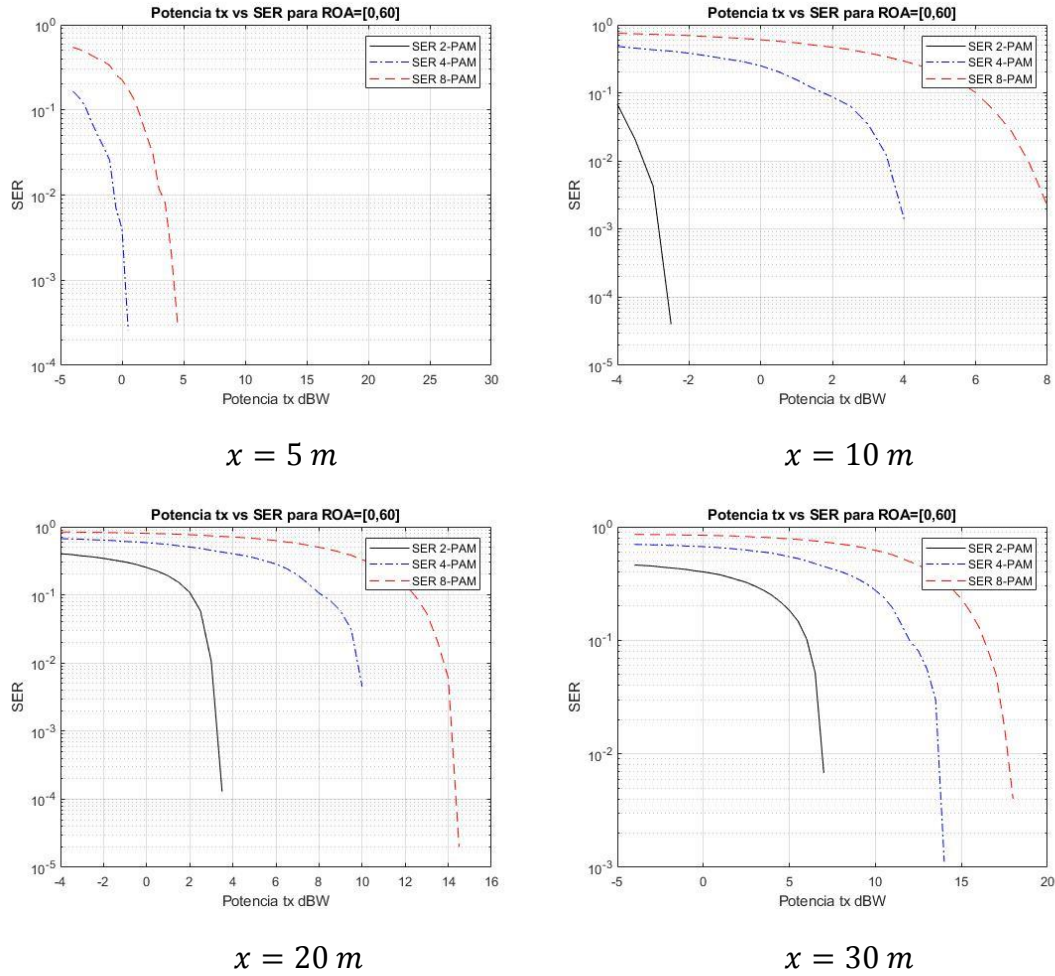
Tras la variación de la orientación del foto-receptor, valoramos que el estado de la comunicación sigue siendo bueno, en comparación con el caso anterior, no se han producido un aumento de errores significativo. Sin embargo, en estas condiciones el sistema sufre limitaciones en potencia. Si nos fijamos en la última gráfica, para poder transmitir a una distancia de 30 m , aplicando una modulación $8 - PAM$, es necesario emplear un nivel de potencia de 25 dBW .

Para poder disminuir la tasa de errores, se precisa una mayor potencia de transmisión. No obstante, el principal motivo de usar la tecnología LED para la transmisión es disminuir los costes energéticos. Por tanto, dichos niveles de potencia no son considerados como valores viables en nuestro sistema, ya que suponen 316 W frente a los 35 W que hemos fijado. En cambio a 20 m , trabajando con una modulación $4 - PAM$, se consigue un nivel de potencia de $15,4 \text{ dBW}$, siendo éste el nivel de potencia al que queremos transmitir, donde a su vez, se consigue una tasa de errores viable. Visto esto, consideramos 20 m como la distancia máxima para nuestro sistema, pues si la superamos, tendremos que emitir mayores niveles de potencia, lo que supone utilizar una tecnología más específica y aumentar el gasto energético.

Por otro lado, debemos tener en cuenta que el receptor, al estar situado en el casco del usuario, puede sufrir una mayor inclinación. Es por ello que nos surge la necesidad de estudiar la viabilidad de nuestro canal para un ángulo $\theta = 60^\circ$

A.3. $\theta = 60^\circ$

Veamos entonces si al aumentar la inclinación de nuestro receptor a $\theta = 60^\circ$ nuestro canal sigue encontrándose dentro de los límites del FoV.

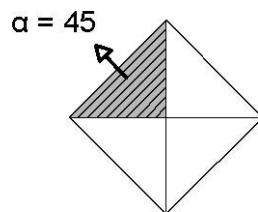


Gráfica 5. A.3. $\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

Si observamos las gráficas obtenidas, nuestro canal no sufre cortes de transmisión al aumentar la inclinación. El nivel de errores sigue siendo similar al caso anterior, por tanto, podemos considerar esta variación sin que el sistema de comunicación se vea afectado.

B. $\alpha = 45^\circ$,

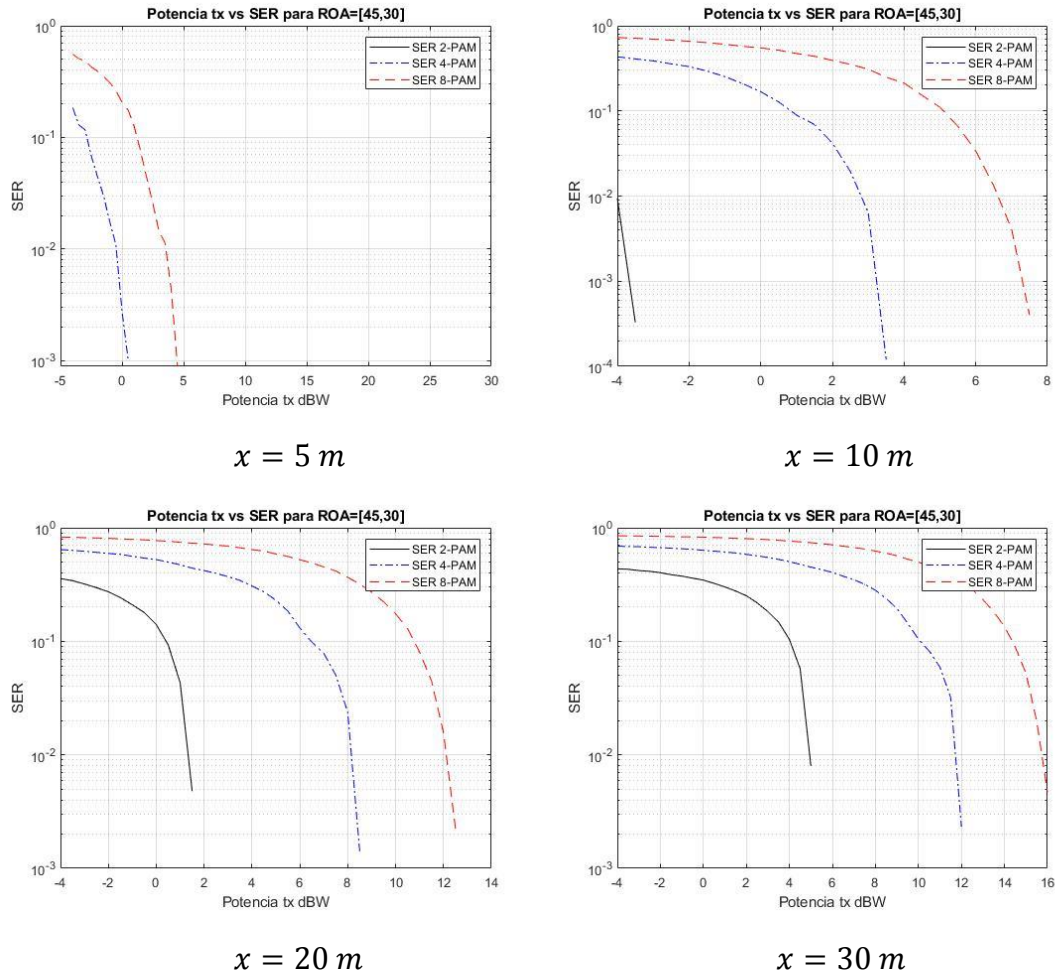
Si orientamos el receptor con un $ROA = [45^\circ, \theta]$, nos encontramos en la cara destacada de la pirámide que sigue a continuación:



Para este caso estudiaremos la viabilidad del canal con las inclinaciones estudiadas en el apartado anterior, $\theta = 30^\circ$ y $\theta = 60^\circ$, ya que consideramos que definen los límites de variación de la inclinación que puede sufrir nuestro receptor.

B.1. $\theta = 30^\circ$

Orientamos, en primer lugar, el receptor con un $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$ con el fin de valorar la viabilidad del sistema VLC planteado analizando las gráficas que siguen a continuación:

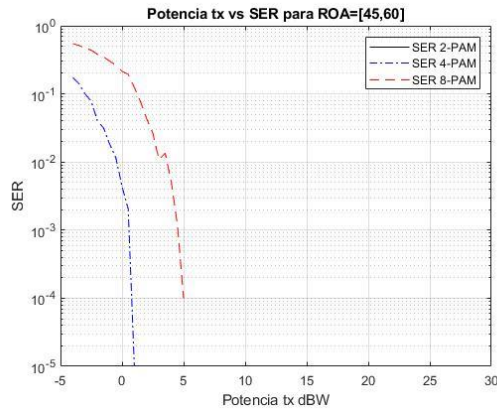


Gráfica 5 A.4. $\alpha = 45^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

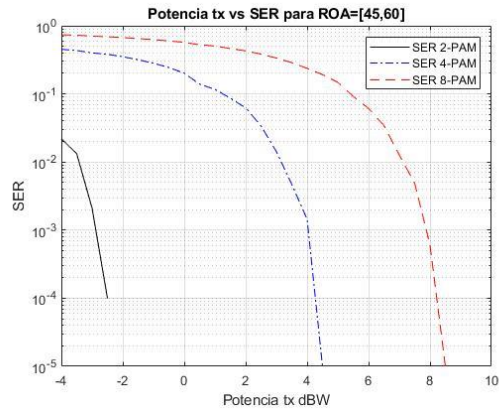
Frente al caso anterior, con esta orientación, la viabilidad del sistema no se ve afectada. Tomamos como referencia el estado del canal para una definición del ángulo $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$ que hemos analizado en el apartado anterior. Como vimos, la respuesta del canal es muy cercana a la respuesta óptima, ya que nos encontramos dentro del campo de visión, y así se refleja en la tasa de errores SER .

B.2. $\theta = 60^\circ$

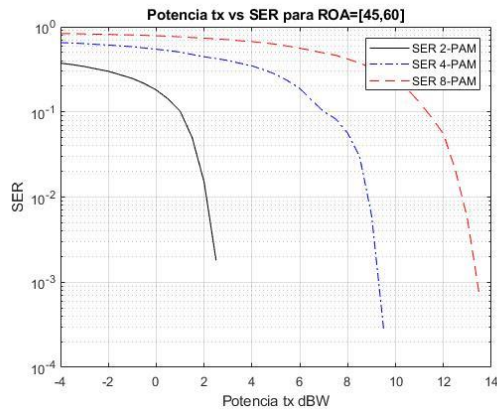
Si elevamos el fotodiodo 60° , la viabilidad de nuestro sistema se puede evaluar en las siguientes gráficas.



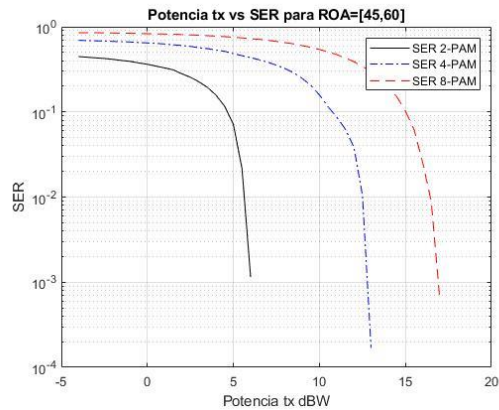
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 m$



$x = 30 m$

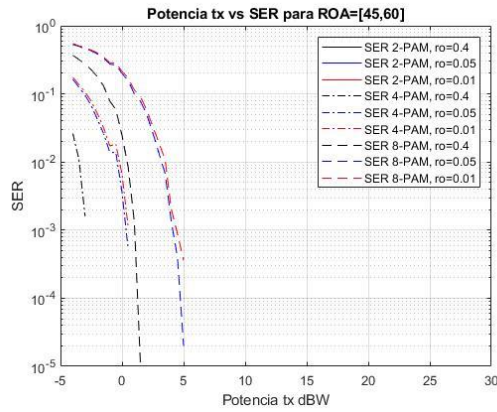
Gráfica 5 A.5. $\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

En comparación con la inclinación anterior, para este caso no se aprecian variaciones de errores significativas. No obstante, uno de los aspectos que si podemos visualizar se corresponde con la limitación en potencia que sufre nuestro sistema si aumenta la distancia entre el transmisor y el usuario. Si aplicamos una modulación 8 – PAM, con el objetivo de disminuir la tasa de error necesitamos transmitir a mayores niveles de potencia, superando en este caso el límite máximo de 15 dBW.

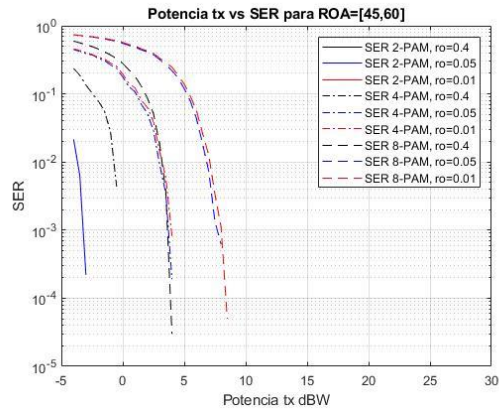
En vista de la limitación en potencia que sufre el sistema en esta situación, consideramos necesario evaluarlo teniendo en cuenta la aportación de la componente de canal NLoS. Para ello realizaremos una comparativa con varios índices de reflexión. Consideramos entonces, los siguientes índices de reflexión:

$\rho = 0.01$, $\rho = 0.05$, $\rho = 0.4$, donde el último índice corresponde con el índice de reflexión del hormigón [47].

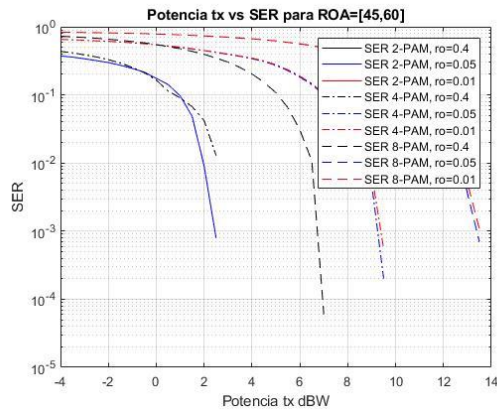
El resultado de la transmisión si tenemos en cuenta las mencionadas reflexiones se aprecia en las siguientes gráficas:



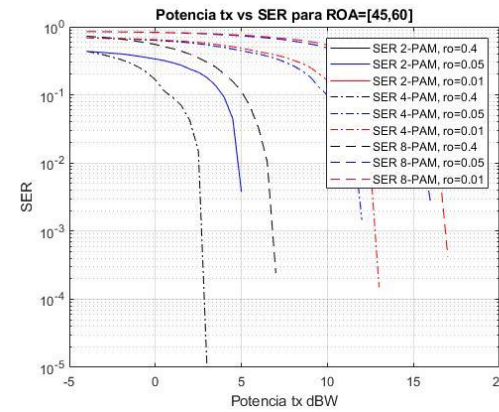
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 m$



$x = 30 m$

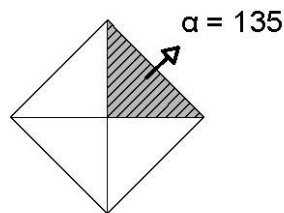
Gráfica 5 A.6. $\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Para un índice de reflexión 0,4 (correspondiente al hormigón, material del que estarán hechas las paredes del túnel, [40]), apreciamos una significativa mejoría en cuanto a niveles de potencia se refiere. Para poder disminuir la tasa de errores, en este caso, no se llega a superar los 15 dBW.

Por otro lado, al considerar también un índice de reflexión bajo, de 0.01, la evolución de la tasa de errores es similar a la de la componente LoS, ya que si consideramos este índice, no se reflejan la mayoría de rayos.

C. $\alpha = 135^\circ$,

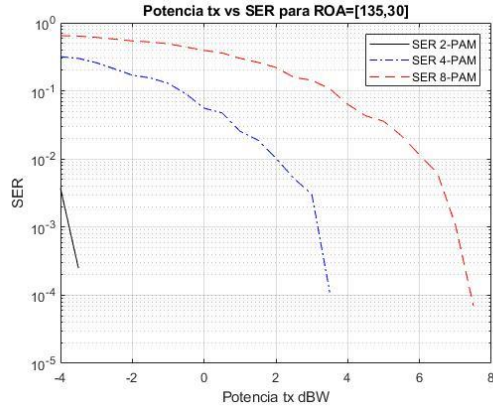
Si orientamos el receptor con un $ROA = [135^\circ, \theta]$, nos encontramos en la cara destacada de la pirámide que sigue a continuación:



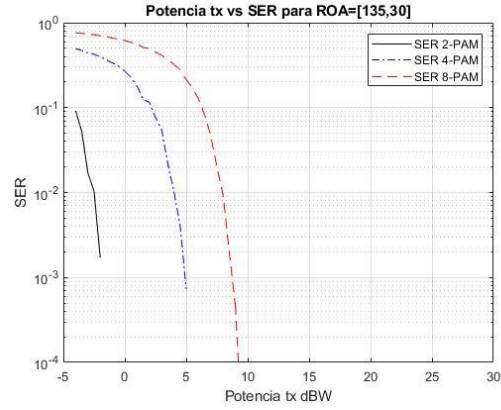
Para esta orientación analizaremos la viabilidad del canal con las inclinaciones estudiadas en los apartados anteriores, $\theta = 30^\circ$ y $\theta = 60^\circ$.

C.1. $\theta = 30^\circ$

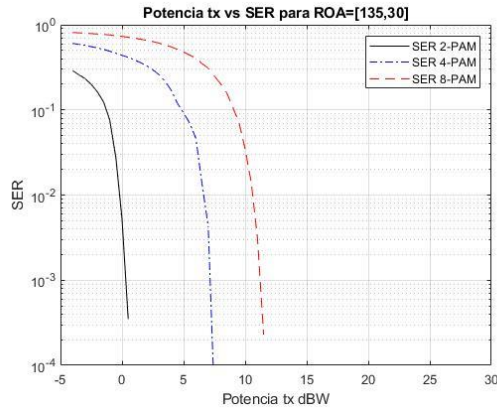
Definimos, en primer lugar, un ángulo de orientación $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$. La viabilidad de nuestro sistema la evaluaremos mediante las gráficas que siguen a continuación:



$x = 5 \text{ m}$



$x = 10 \text{ m}$



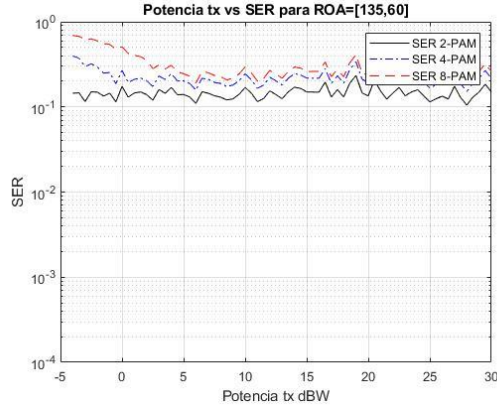
$x = 15 \text{ m}$

Gráfica 5. A.7. $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

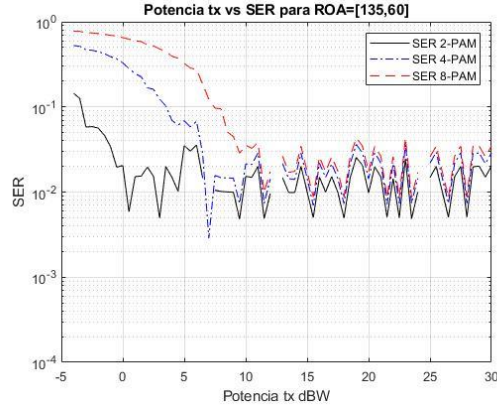
Para una distancia de 5 m , comparando el resultado obtenido frente a casos anteriores, vemos como la probabilidad de error ha aumentado levemente. No obstante, la calidad del sistema, en estas condiciones, es mejor que la obtenida en el apartado donde analizamos el canal frente a la distancia. Recordemos que, en el apartado anterior, esta orientación obtenía niveles bajos de amplitud del canal, provocado por dónde estaba situado el receptor (cerca de la pared). En este caso, consideramos que el receptor se está moviendo a lo ancho del túnel, es por esto que se aprecia cierta mejora frente al comportamiento del apartado anterior. Además, si aumentamos la distancia entre la luminaria LED y el usuario receptor la tasa de errores sigue siendo viable.

C.2. $\theta = 60^\circ$

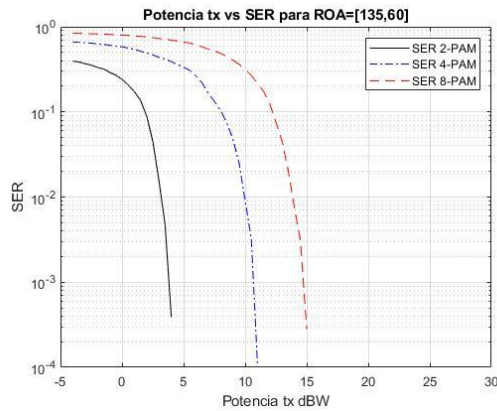
A continuación, modificaremos el ángulo de orientación a $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$. Las gráficas siguientes nos servirán de guía para evaluar la comunicación entre el par transmisor-receptor:



$x = 5\text{ m}$



$x = 10\text{ m}$

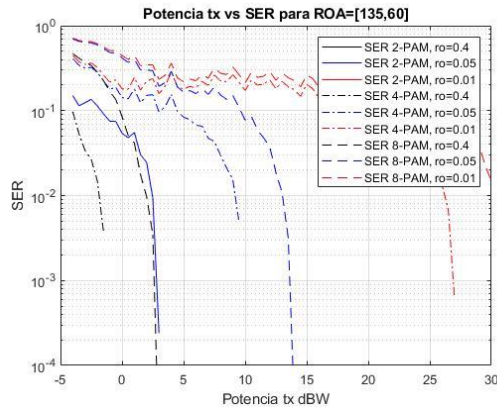


$x = 20\text{ m}$

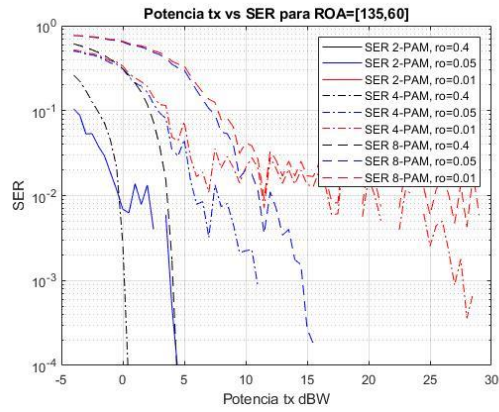
Gráfica 5. A.8. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

El resultado de la tasa de error SER , para $\theta = 60^\circ$ y situando al receptor cerca de la luminaria LED, es decir, a 5 y 10 m, nuestro sistema se considera un sistema dañado, debido a que para la primera distancia considerada, la probabilidad de error se aproxima a 1, y para la segunda distancia considerada aparece el conocido 'suelo SER'. La aparición del 'suelo SER' significa que, aunque aumentemos más el nivel de potencia transmitida no conseguiremos disminuir la tasa de error. No obstante, si el receptor se sitúa a una distancia de 20 m, la situación mejora considerablemente.

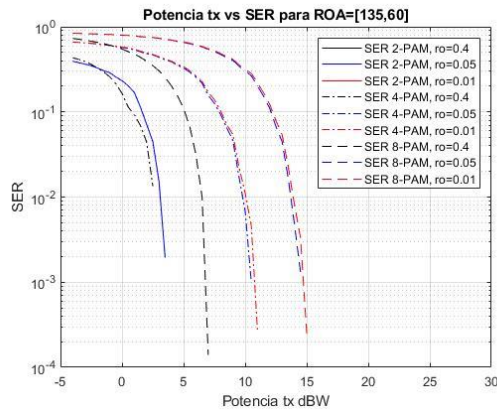
A la vista de los resultados anteriores, consideramos la necesidad de tener en cuenta la componente de reflexión del canal para comprobar si la aportación de dicha componente mejorar los resultados obtenidos para la componente LoS. Analicemos entonces la tasa de error obtenida en las siguientes graficas:



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$



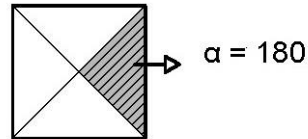
$$x = 20 m$$

Gráfica 5. A.9. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Teniendo en cuenta la componente reflexiva y para $\rho = 0.4$ se consiguen mitigar los errores producidos a distancias cercanas al transmisor. Este resultado es un ejemplo más de la mejora que supone considerar las reflexiones en nuestro sistema.

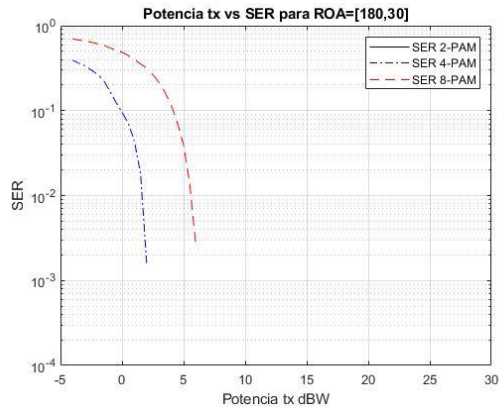
D. $\alpha = 180^\circ$,

Situémonos ahora en la cara que destacada de la pirámide receptora, donde el ángulo ROA se define como $ROA = [180^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma los siguientes valores $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

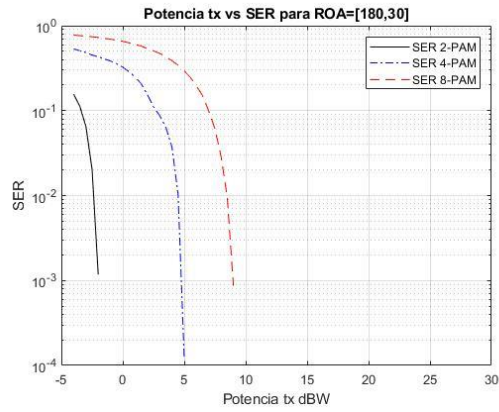


D.1. $\theta = 30^\circ$

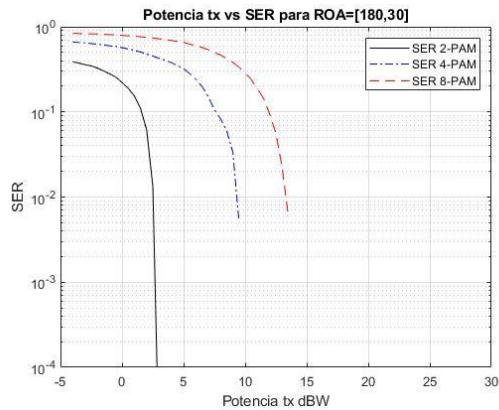
Analicemos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$. La tasa de error SER obtenida se muestra en las siguientes graficas



$$x = 5 m$$



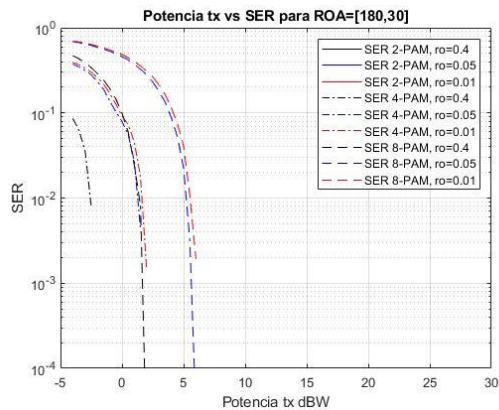
$$x = 10 m$$



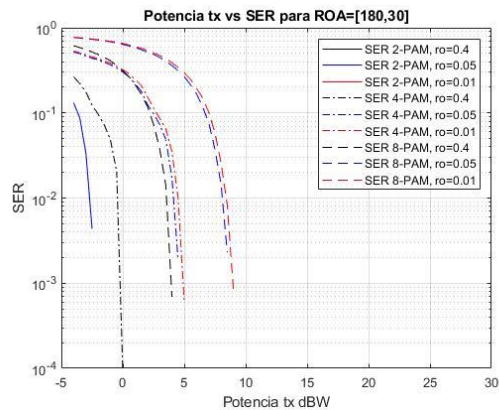
$$x = 20 m$$

Gráfica 5. A.10. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

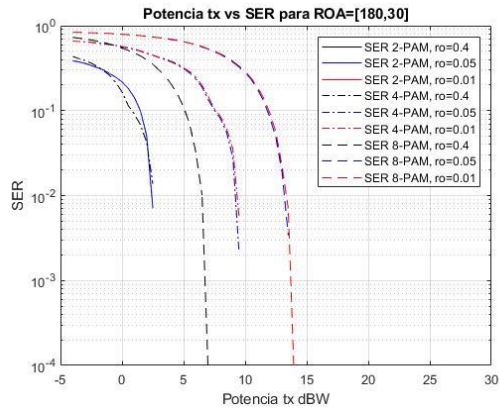
En línea con los casos anteriores, para esta orientación, el sistema sigue obteniendo una tasa de error de símbolo viable. Si sólo consideramos la componente LoS y obtenemos buenos resultados, al tener en cuenta, además, la componente NLoS, los errores obtenidos deberán disminuir. Comprobemos esta hipótesis en las siguientes imágenes:



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$



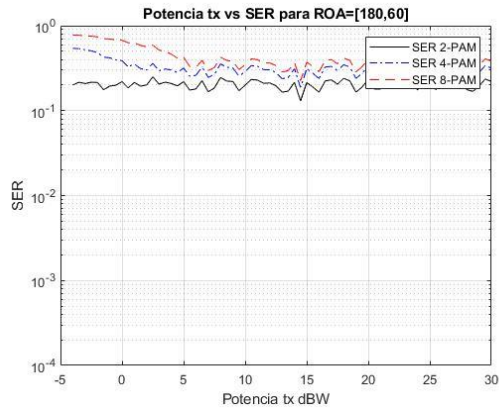
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. A.11. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

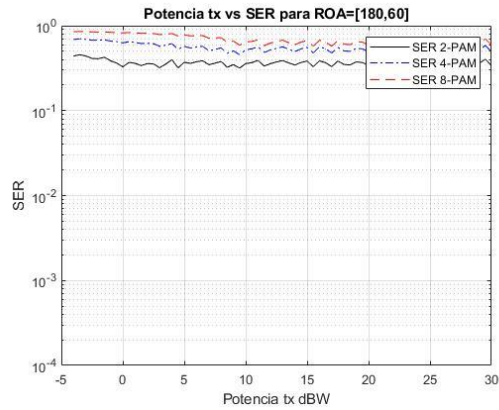
Tal y como hemos supuesto, la tasa de error mejora considerablemente para un índice de reflexión de 0.4.

D.2. $\theta = 60^\circ$

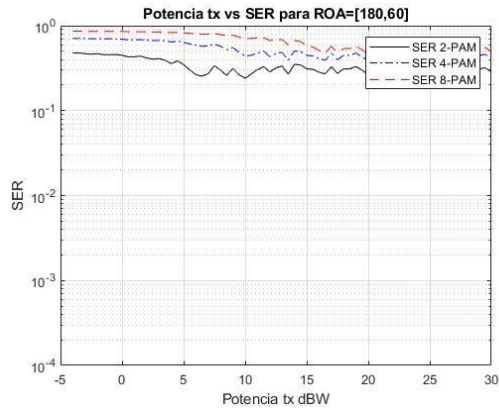
Si inclinamos ahora el receptor un ángulo de $\theta = 60^\circ$, tal y como se representa en la figura, la tasa de error de símbolos obtenida es la siguiente:



$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$

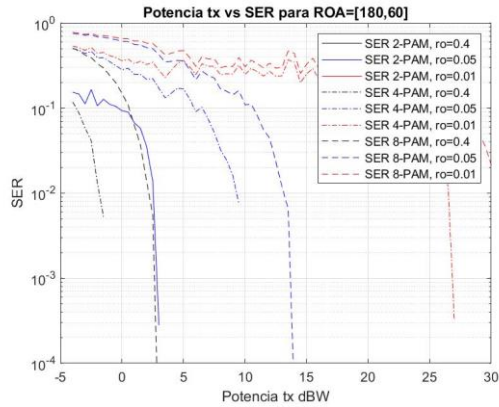


$$x = 20 \text{ m}$$

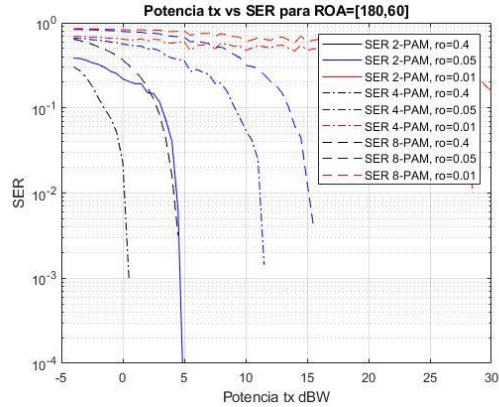
Gráfica 5. A.12. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

Para esta orientación la probabilidad de error de símbolo se aproxima a 1, es decir, en esta situación, si sólo tenemos en cuenta la componente de visión directa para establecer la comunicación, no nos será posible transmitir nada. Esta situación también se vio reflejada cuando analizamos dicha orientación para la componente LoS en función de la distancia, donde en sus gráficas se aprecia con claridad cortes en la comunicación.

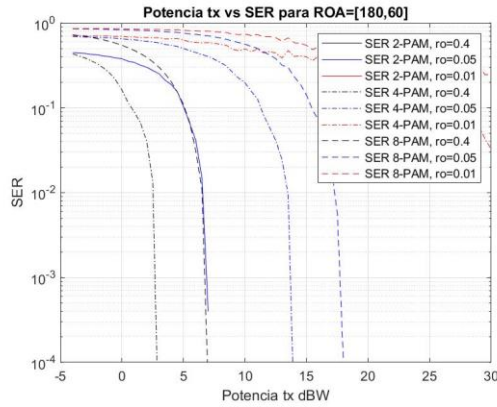
A causa de esta situación, añadiremos la componente NLoS a nuestro estudio, así comprobaremos si es posible establecer una comunicación para un ángulo $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$.



$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



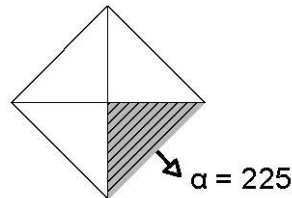
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. A.13. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Las gráficas anteriores nos corroboran la posibilidad de establecer una comunicación entre el receptor y el transmisor si tenemos en cuenta la componente de reflexión. Podemos apreciar que cuanto más lejos estemos de la luminaria LED mejora la tasa de errores. Esto es porque a una distancia mayor es posible recibir mayor número de rayos reflejados que mejoren la transmisión.

E. $\alpha = 225^\circ$,

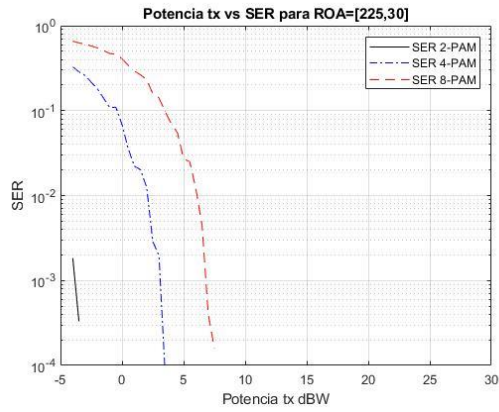
Si a continuación determinamos el valor del ángulo $\alpha = 225^\circ$, el fotodiodo receptor se encuentra en orientado tal y como se muestra a continuación:



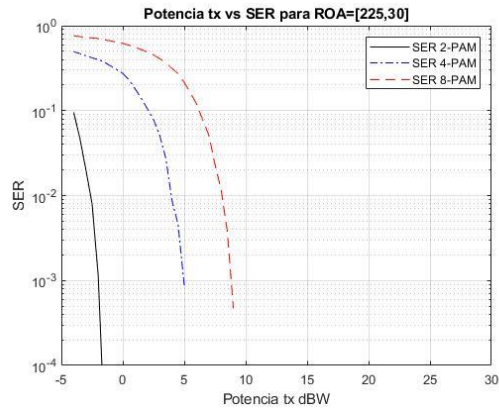
En este caso, evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [225^\circ, 60^\circ]$.

E.1. $\theta = 30^\circ$

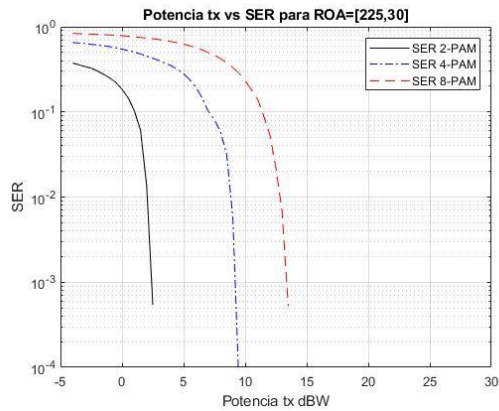
En este apartado, orientamos el receptor con un ángulo $ROA = [225^\circ, 30^\circ]$. En esta situación, y teniendo en cuenta que sólo trabajamos con la componente de visión directa del canal planteado, la tasa de errores SER obtenida es la siguiente:



$x = 5 m$



$x = 10 m$



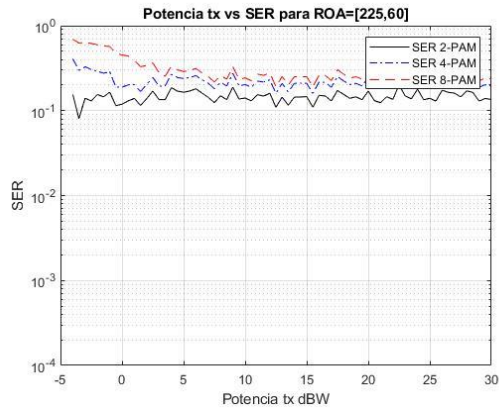
$x = 20 m$

Gráfica 5. A.14. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

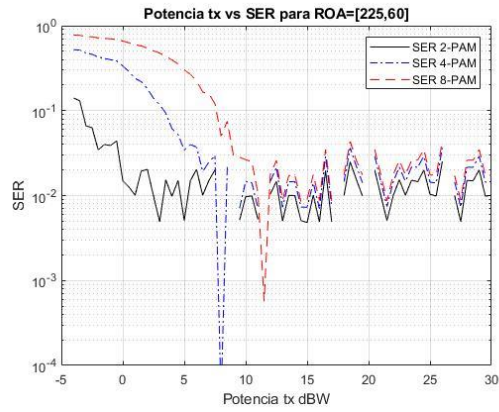
La tasa de errores que obtenemos para un valor de $\alpha = 225^\circ$, es similar a su correspondiente caso simétrico, es decir $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Recordemos que si aplicamos codificación al sistema de comunicación planteado, los errores que sean inferiores a 10^{-2} , tras la codificación tienden a 0 [49]. Por consiguiente, tras aplicar codificación por parte del transmisor, será posible obtener un sistema de comunicación bueno.

E.2. $\theta = 60^\circ$

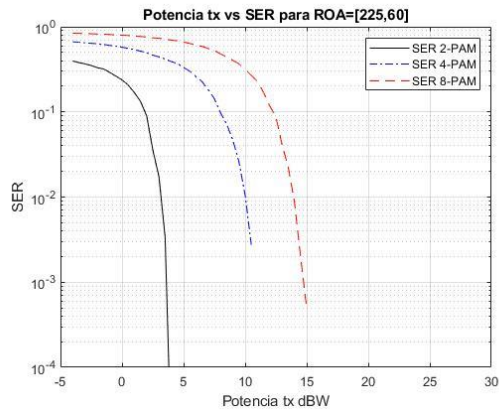
Analicemos a continuación, la tasa de errores obtenida si aumentamos la inclinación del receptor a $\theta = 60^\circ$.



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$

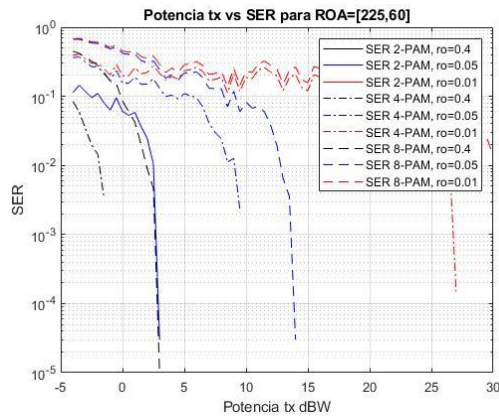


$$x = 20 m$$

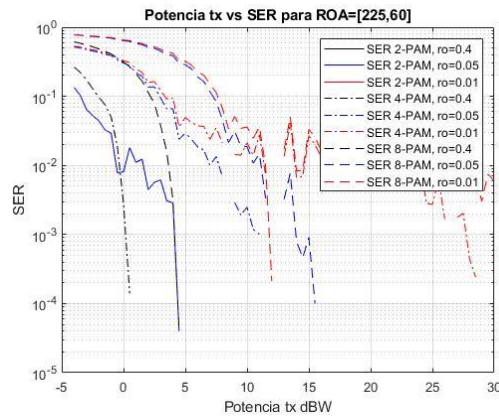
Gráfica 5. A.15. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

Por la simetría del receptor planteado, de nuevo obtenemos un resultado similar al obtenido con la orientación $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$. Al igual que en su simétrico, es necesario considerar la contribución de la componente NLoS para mejorar la calidad de transmisión a distancias cercanas al transmisor.

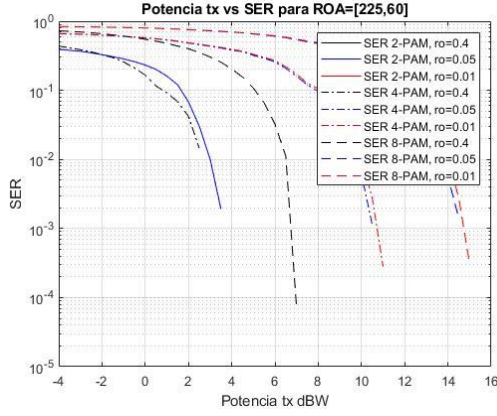
Analicemos entonces el resultado de dicha aportación. Las gráficas que representan la tasa SER en esta situación, son las que siguen a continuación:



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$



$$x = 20 \text{ m}$$

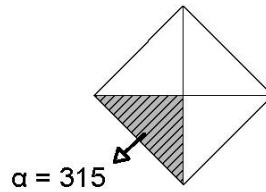
Gráfica 5. A.16. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Comprobamos de nuevo, que tras aplicar la componente de reflexión a nuestro sistema, si determinamos un índice de reflexión de 0.4, las condiciones de transmisión mejoran considerablemente. Por ejemplo, para una modulación 2 – PAM, si el receptor se encuentra cerca del transmisor, la tasa de error que, en un principio al considerar solo la componente LoS era próxima a 1, tras aportar la componente NLoS, se transforma a una probabilidad de error igual a 0.

Esto ocurre porque la componente difusa no depende del ángulo de incidencia, ya que, aun encontrándose $\varphi_l^{[k]}$ próxima a los límites del campo de visión, la componente NLoS sigue respondiendo bien aportando ganancia al sistema, tal y como queda comprobado en este y apartados anteriores.

F. $\alpha = 315^\circ$,

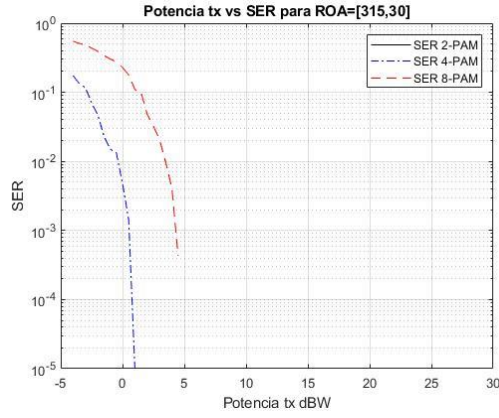
Determinaremos a continuación un ángulo $\alpha = 315^\circ$, en esta situación, el fotodiodo receptor se encuentra en orientado tal y como se muestra a continuación:



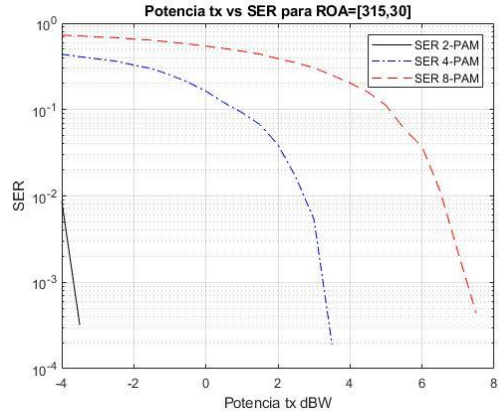
En este caso, evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [315^\circ, 60^\circ]$.

F.1. $\theta = 30^\circ$

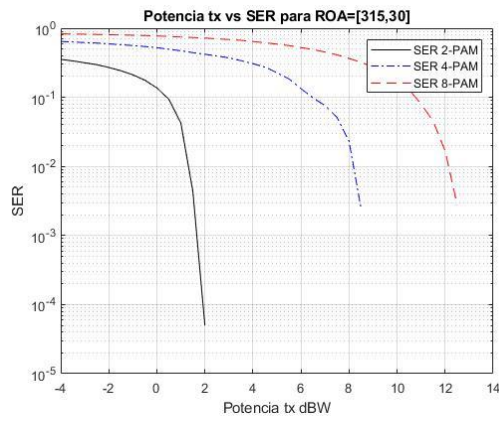
Analicemos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$. La tasa de error SER obtenida se muestra en las siguientes graficas



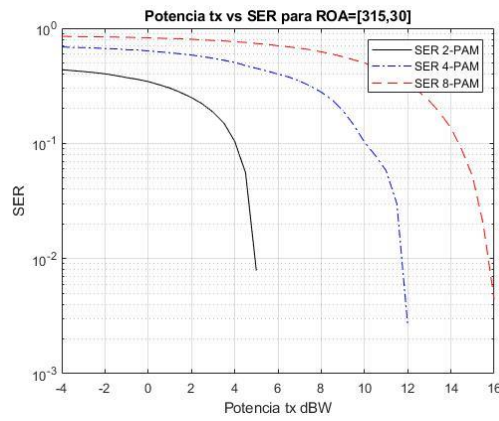
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 m$



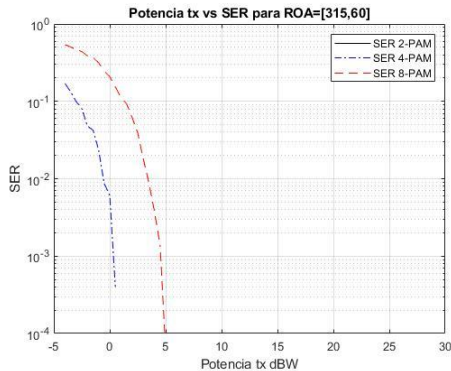
$x = 30 m$

Gráfica 5. A.17. $\alpha = 315^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

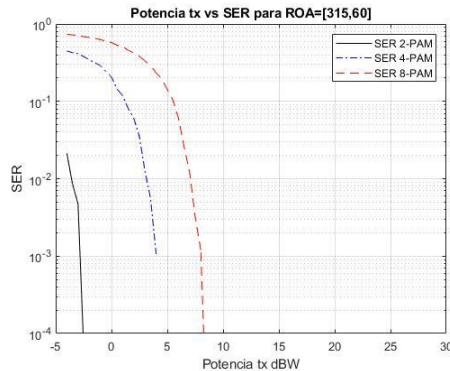
El resultado obtenido para la configuración que hemos planteado en este apartado, es similar al planteado en el apartado b.1, el cual corresponde a su caso simétrico, donde $\alpha = 45^\circ$. Para ambos casos, caracterizamos el sistema de transmisión como un buen sistema, donde es posible obtener una buena calidad de señal.

F.2. $\theta = 60^\circ$

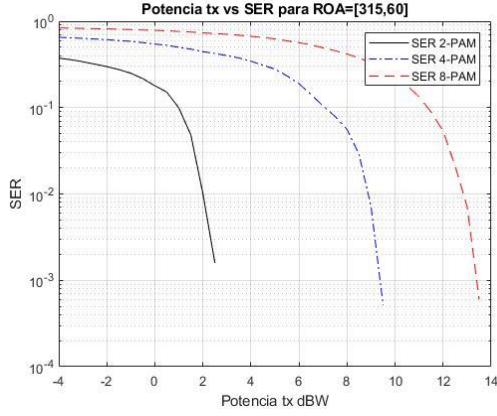
Probamos ahora orientar el fotodiodo con una inclinación de $\theta = 60^\circ$, la tasa de error obtenida la mostramos a continuación:



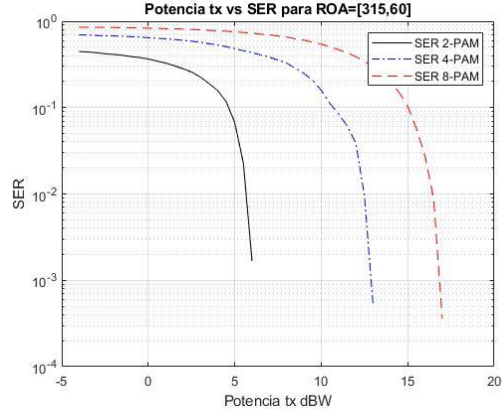
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 \text{ m}$



$x = 30 \text{ m}$

Gráfica 5. A.18. $\alpha = 315^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

Apreciamos de nuevo la simetría que nos proporciona nuestro receptor. Los resultados que hemos obtenido son semejantes a los obtenidos con la orientación determinada por el ángulo $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$, los cuales nos muestran una tasa de error que podemos considerar en nuestro sistema.

5.B. USUARIO ALEATORIO

En este apartado trataremos de evaluar la comunicación entre el par transmisor-receptor teniendo en cuenta que el receptor puede tomar posiciones aleatorias. Surge la necesidad de considerar esta condición porque instalaremos nuestro sistema de comunicación en un túnel en proceso de construcción, donde el frente de onda con el que trabajaremos irá distanciándose del transmisor a medida que el túnel tenga más profundidad.

Es por esto que definiremos la posición del usuario como aleatoria entre determinados rangos, a lo largo del eje x^+ . En primer lugar, consideramos una distancia de 0 a 5 m donde el usuario se moverá aleatoriamente. Luego consideramos un rango de 0 a 10 m, de 0 a 20 m, y por último, de 0 a 30 m. A lo largo del eje y , el usuario se moverá a lo ancho del túnel, al igual que el apartado anterior.

Transmisor LED: posición = [0 m, 5 m, 5 m]

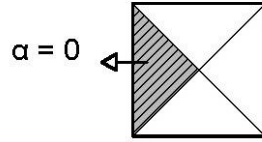
Usuario receptor: posición = [x, y, z]

Donde $x \in [0,5]$, $x \in [0,10]$, $x \in [0,20]$, $x \in [0,30]$, $y \in [0,10]$, $z = 0.85 \text{ m}$

De la misma forma que en el apartado anterior, cada fotodiodo receptor forma una cara de la pirámide. La base de ésta se enganchará al casco del usuario o en la maquinaria. Como hemos señalado anteriormente, cada cara de la pirámide se definirá con una orientación determinada, con el y mencionado ROA.

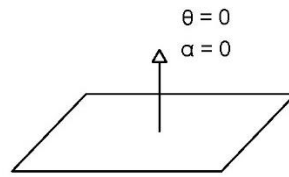
A. $\alpha = 0^\circ$,

La pirámide foto-receptora, para un valor de $\alpha = 0^\circ$, apunta al transmisor tal y como se muestra en la siguiente imagen:



En línea similar con lo analizado para el caso de usuario fijo, para esta primera orientación observamos de nuevo la cantidad de errores que se obtienen si situamos el receptor en el plano xy , y evaluaremos cómo responde el sistema si aumentamos la inclinación del receptor frente al eje z .

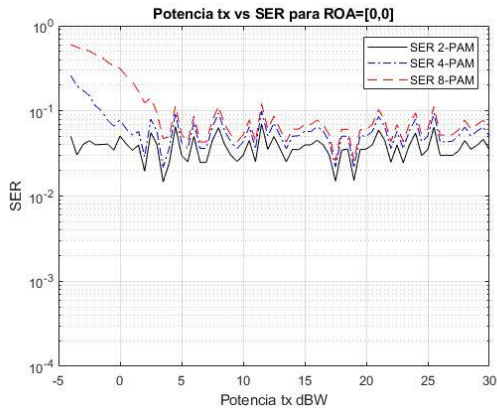
Por tanto, el fotodiodo no presenta ninguna inclinación frente al eje z , sino que se encuentra situado en el plano xy .



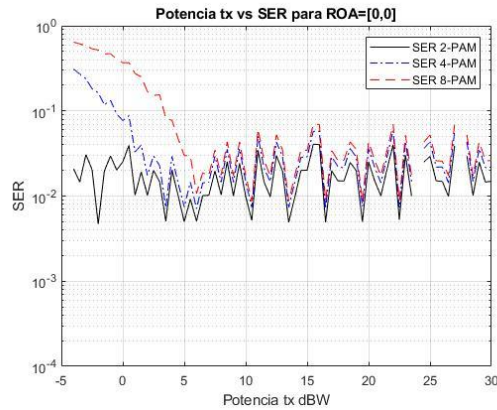
La tasa de error, en esta situación, se aprecia en las siguientes gráficas.

A.1. $\theta = 0^\circ$

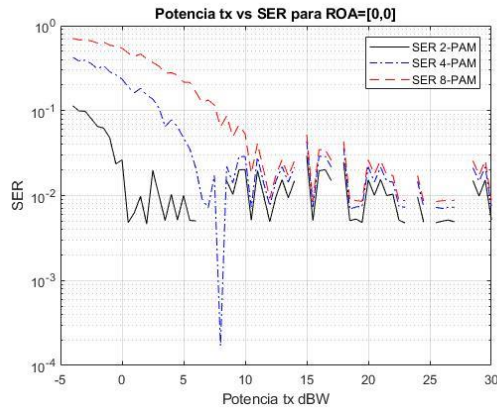
Comenzamos el análisis de error situando el receptor en el plano xy . Al no existir inclinación frente al eje z , el valor del ángulo θ es igual a $\theta = 0^\circ$. La tasa de error que se obtiene con esta situación se muestra en las gráficas que siguen a continuación:



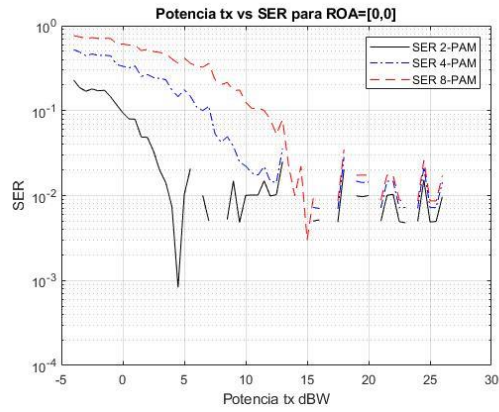
$x = 5 \text{ m}$



$x = 10 \text{ m}$



$$x = 20 \text{ m}$$

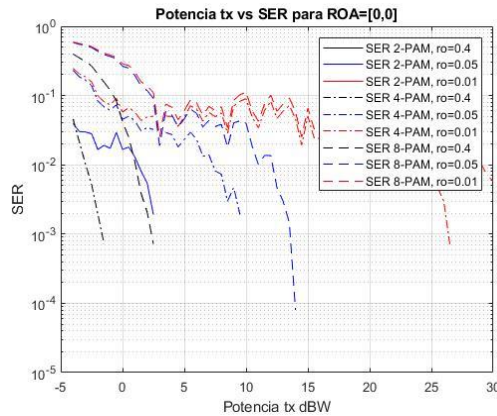


$$x = 30 \text{ m}$$

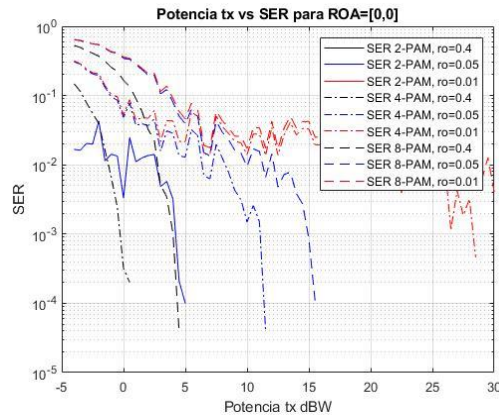
Gráfica 5. B.1. $\alpha = 0^\circ, \theta = 0^\circ$. Canal LoS

Para este primer caso, la tasa de error de símbolo que obtenemos es elevada. Obtenemos valores de aproximadamente 10^{-1} , donde resulta difícil mitigar los errores si sólo consideramos la componente de visión directa ya que, a los 5 m aparece el ya mencionado ‘suelo SER’. Por mucho que aumentemos el nivel de potencia lumínica, a partir de 5 dBW aproximadamente, tal y como se aprecia en la primera gráfica, no es posible disminuir la tasa de error. Si la distancia aumenta, se aprecia una leve mejoría, pues el ‘suelo SER’ aparece a un nivel de error de 10^{-2} .

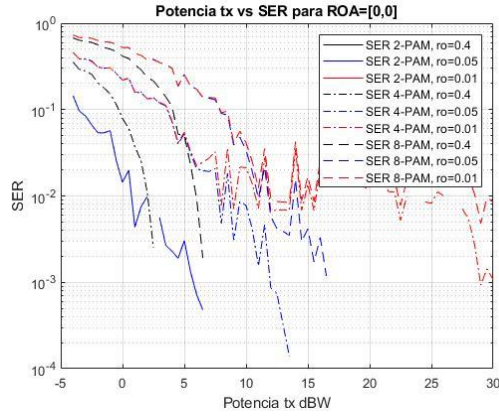
A la vista de los resultados obtenidos, vemos que no es suficiente considerar sólo la componente LoS para nuestro sistema si consideramos un usuario aleatorio, probemos entonces qué pasaría si añade a nuestra evaluación la componente reflexiva.



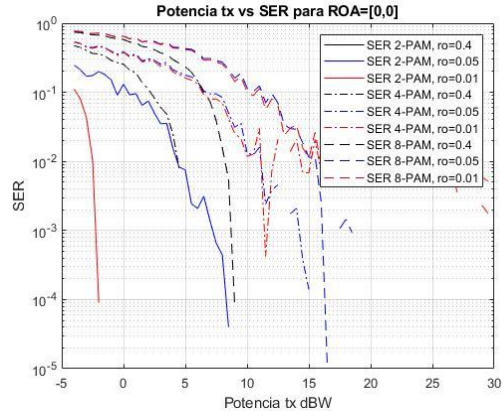
$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



$$x = 20 \text{ m}$$



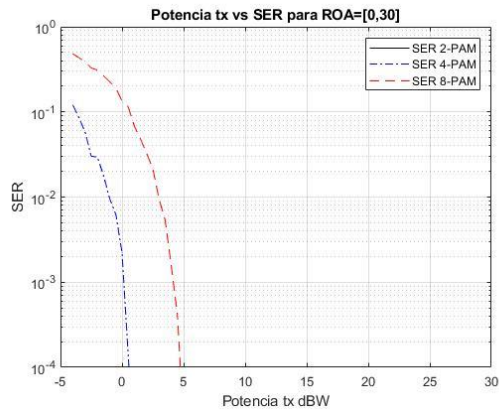
$$x = 30 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.2. $\alpha = 0^\circ, \theta = 0^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

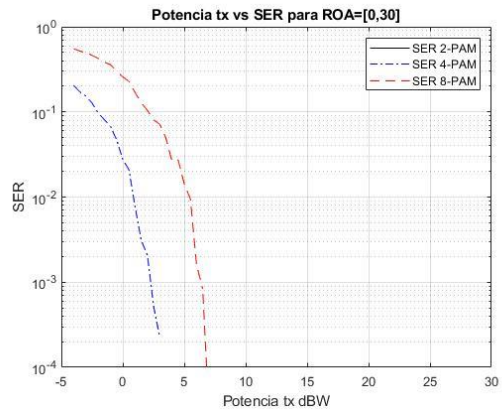
Si consideramos un coeficiente de reflexión igual a 0.4, las condiciones de error mejoran significativamente, para una modulación 2 – PAM, la tasa de error es nula hasta para la mayor distancia considerada, 30 m. Si por el contrario consideramos la modulación 8 – PAM, la cual nos ofrecería una mayor velocidad de transmisión, para $\rho = 0.4$ se conseguirían una tasa de error viable para nuestro sistema, al igual que si determinamos el coeficiente de reflexión con un valor igual a 0.05. Podemos apreciar a su vez, que si evaluamos nuestro sistema para un coeficiente de 0.01 el resultado obtenido sería muy similar al que hemos obtenido anteriormente teniendo en cuenta sólo la componente LoS.

A.2. $\theta = 30^\circ$

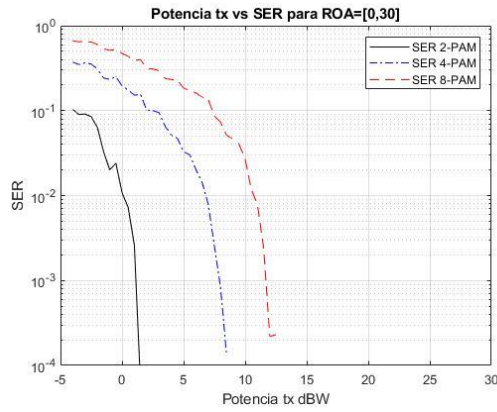
Tras los resultados obtenidos en la orientación anterior, justificamos la necesidad de aumentar la inclinación del receptor con el fin de mejorar la tasa de error resultante para la componente de visión directa. Por tanto, en este apartado analizaremos el resultado de la componente LoS para una inclinación de $\theta = 30^\circ$:



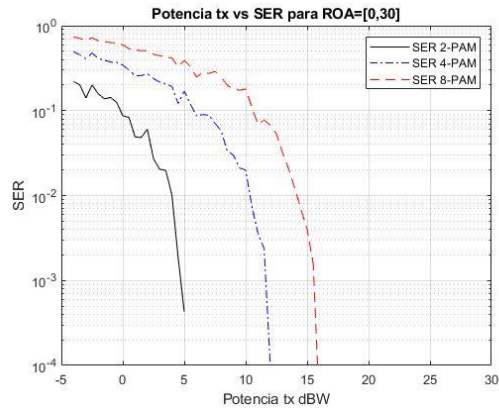
$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



$$x = 20 \text{ m}$$



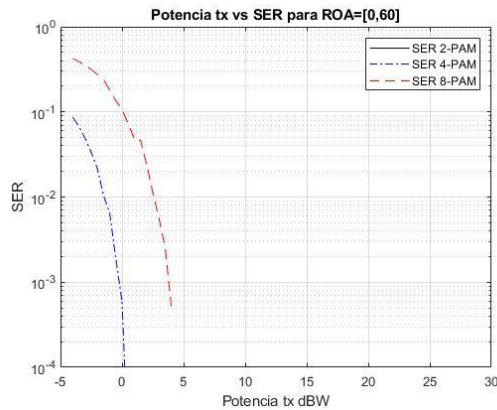
$$x = 30 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.3. $\alpha = 0^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

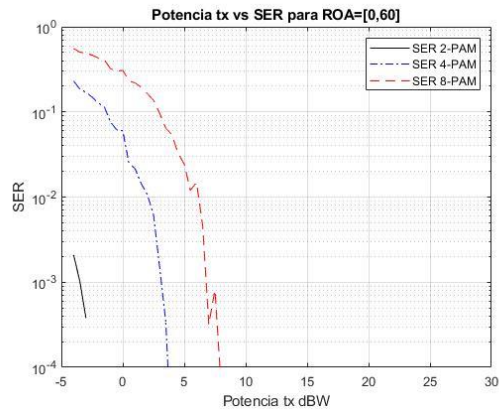
La inclinación del receptor demuestra, de nuevo, la mejoría que supone para nuestro sistema considerar una elevación de $\theta = 30^\circ$. Los buenos resultados que se obtienen tras realizar dicha modificación, justifican la necesidad de considerar el receptor piramidal planteado en vez de simplemente usar un receptor plano.

A.3. $\theta = 60^\circ$

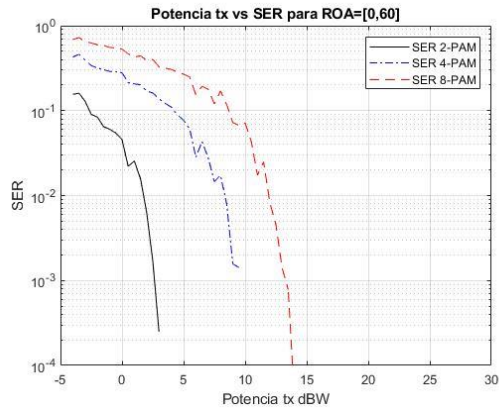
A continuación, elevamos el receptor un ángulo $\theta = 60^\circ$, de esta manera obtenemos la tasa *SER* que se muestran en las gráficas que siguen:



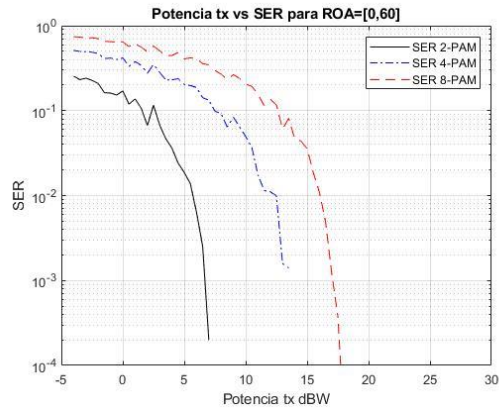
$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



$$x = 20 \text{ m}$$

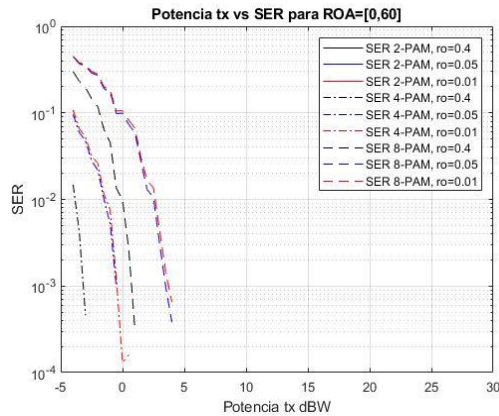


$$x = 30 \text{ m}$$

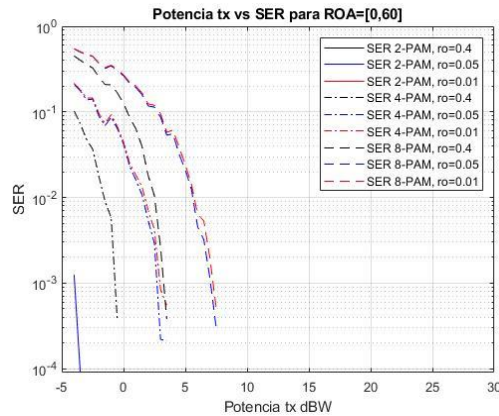
Gráfica 5. B.4. $\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

El aumento de la inclinación no ha supuesto ninguna distorsión en cuanto a la calidad obtenida, el resultado es similar al que se ha conseguido con el ángulo de orientación $ROA = [0^\circ, 30^\circ]$. No obstante, se aprecia una cierta limitación en potencia a medida que el usuario aleatorio se distancia de la luminaria.

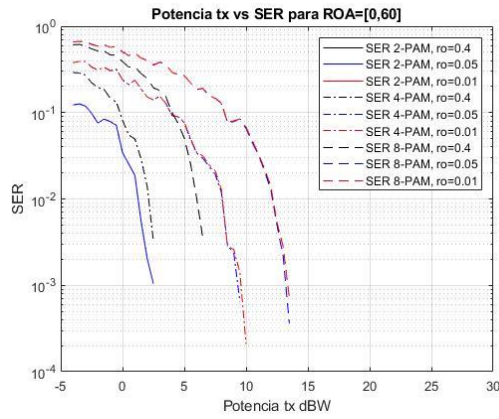
A continuación, analizaremos si la aportación de la componente reflexiva disminuye la limitación en frecuencia que sufre nuestro sistema para esta orientación.



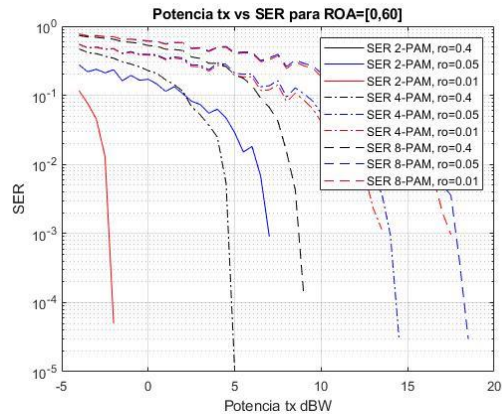
$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



$x = 20 \text{ m}$



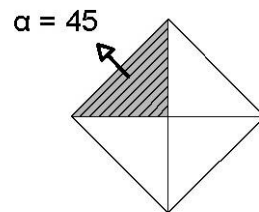
$x = 30 \text{ m}$

Gráfica 5. B.5. $\alpha = 0^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Fijándonos en la última gráfica representada, la correspondiente a una distancia de 30 m , como se ha visto antes, sin tener en cuenta la componente reflexiva el nivel de potencia necesario para mitigar la tasa de error superaba los 15 dBW , sin embargo, al tener en cuenta la componente NLoS, para una reflexión de 0.4 , logramos disminuir el nivel de potencia necesario.

B. $\alpha = 45^\circ$,

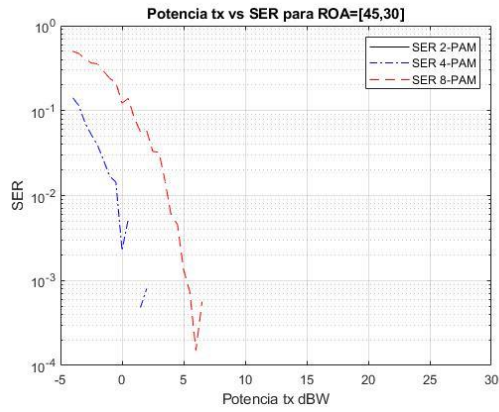
Definimos a continuación un ángulo $\alpha = 45^\circ$. El fotodiodo receptor se encuentra en orientado tal y como se muestra a continuación:



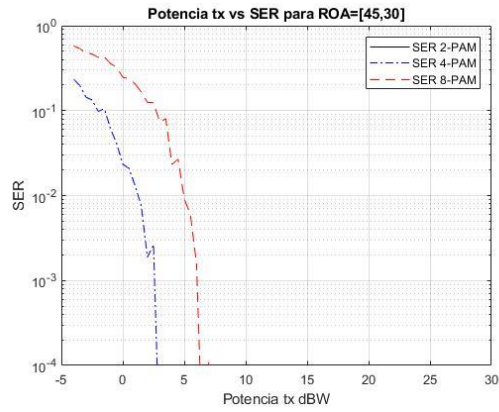
En este caso, evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [45^\circ, 60^\circ]$.

B.1. $\theta = 30^\circ$

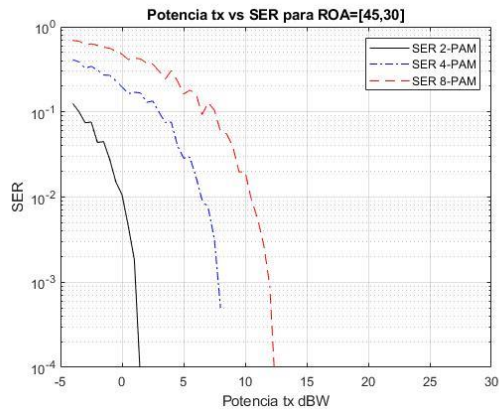
Comenzamos el análisis para un ángulo $\theta = 30^\circ$,



$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



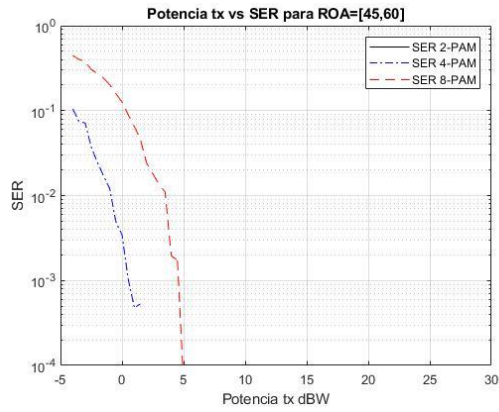
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.6. $\alpha = 45^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

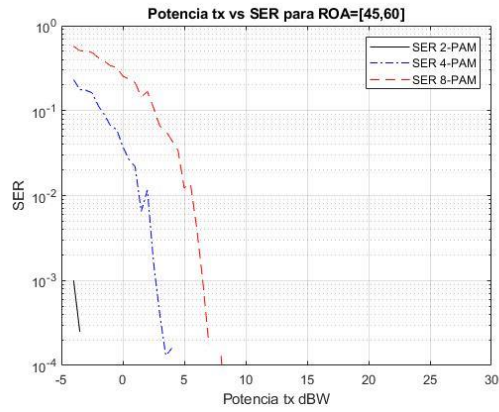
Al igual que en el caso anterior, la viabilidad del sistema no se ve afectada. Como ya vimos, con esta orientación, la amplitud del canal en función de la distancia es muy similar al óptimo. Esta buena situación se ve reflejada en los bajos niveles de error que se dan en el sistema.

B.2. $\theta = 60^\circ$

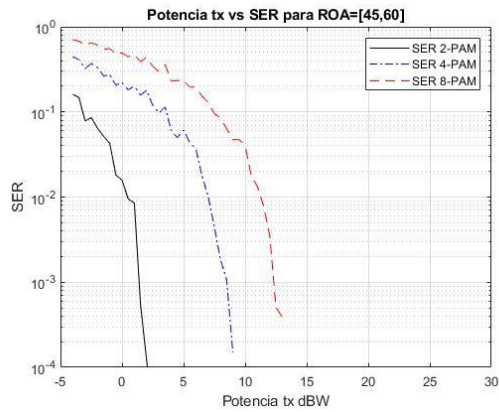
Aumentamos la inclinación a $\theta = 60^\circ$, la tasa de error de símbolo que se obtiene se muestra a continuación:



$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



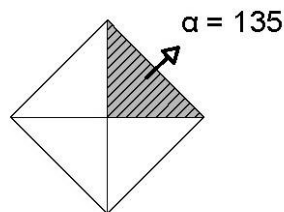
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.7. $\alpha = 45^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

La tasa de error de símbolo obtenida sigue la misma línea que el caso anterior, la calidad del sistema es buena, y no existe limitación en potencia.

C. $\alpha = 135^\circ$,

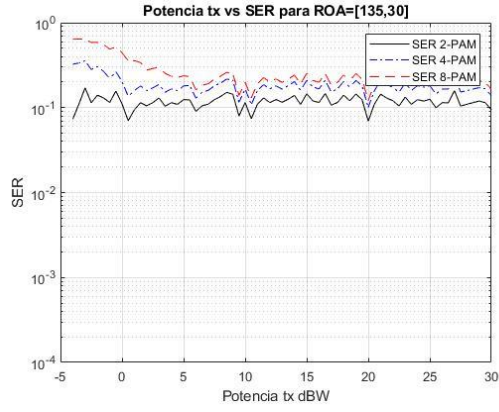
En este apartado, determinamos un valor de $\alpha = 135^\circ$, de esta manera orientamos el fotodiodo receptor tal y como se muestra a continuación:



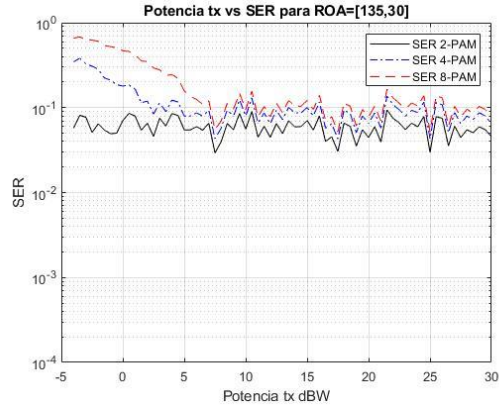
En este caso, evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$.

C.1. $\theta = 30^\circ$

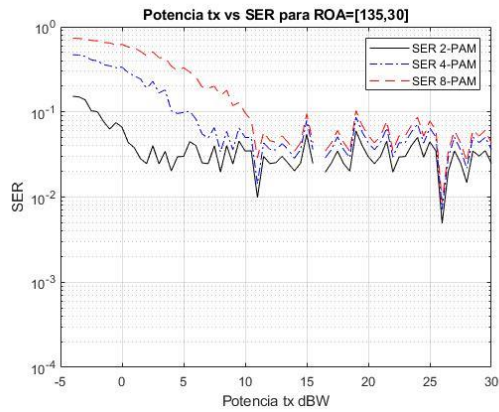
Analizamos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$,



$$x = 5 m$$



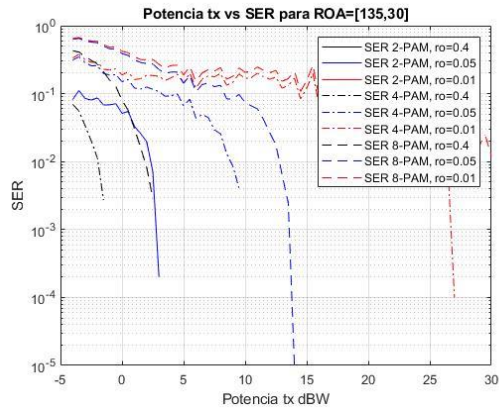
$$x = 10 m$$



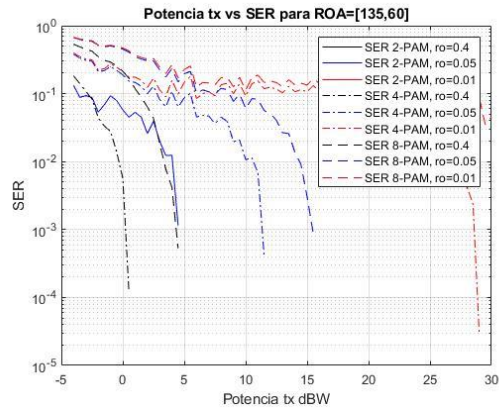
$$x = 20 m$$

Gráfica 5. B.8. $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

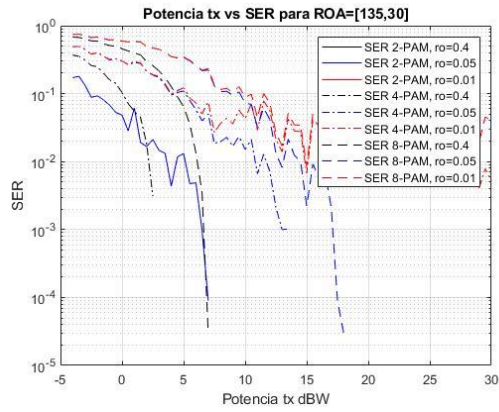
Observamos un deterioro significativo de la viabilidad de la señal si consideramos a los usuarios aleatorios. En el apartado anterior, donde para la misma orientación se trabajaba con usuario fijo, la tasa de error era mucho menor. En este caso, la aleatoriedad del usuario conlleva a que el usuario pueda encontrarse fuera de los límites del FoV. Debido a esto, necesitamos la aportación de la componente NLoS para conseguir establecer una comunicación. Evaluaremos el sistema con esta condición en las siguientes gráficas:



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$



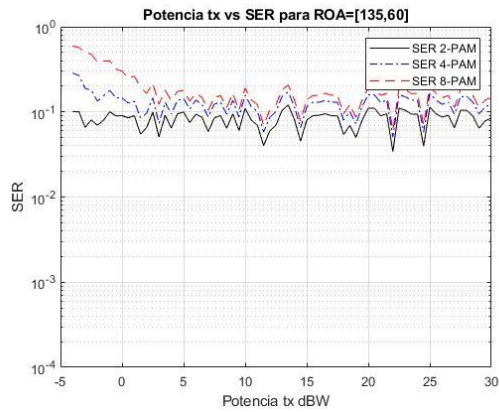
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.9. $\alpha = 135^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

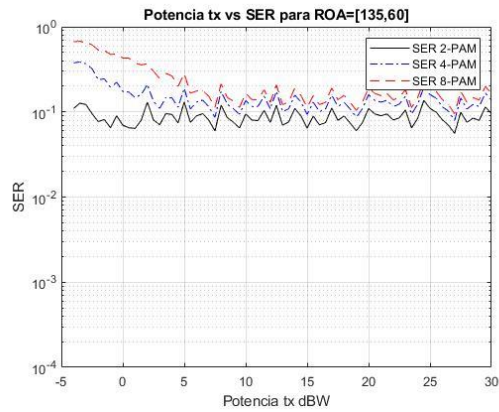
Si trabajamos con un coeficiente de reflexión de 0.4, la viabilidad del sistema mejora considerablemente. En estas condiciones sí es posible establecer comunicación entre el transmisor y el receptor. Éste es otro ejemplo más de la gran aportación en ganancia que supone tener en cuenta las reflexiones para este sistema.

C.2. $\theta = 60^\circ$

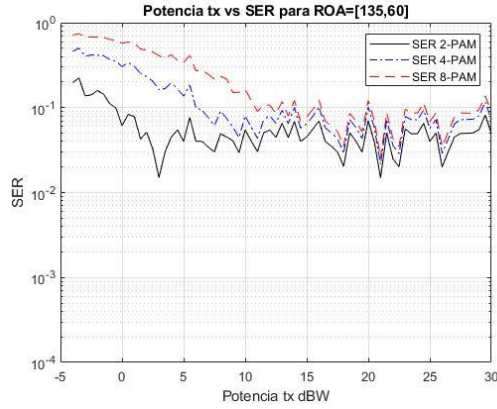
Probemos a continuación una inclinación de $\theta = 60^\circ$,



$$x = 5 \text{ m}$$



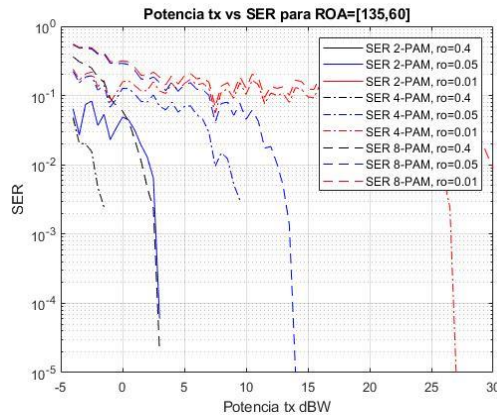
$$x = 10 \text{ m}$$



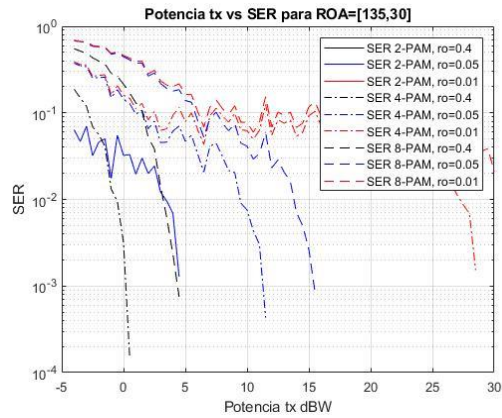
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.10. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

Como era de suponer, la inclinación para esta orientación no ha mitigado los errores existentes en el sistema. Consideramos de nuevo necesaria la aportación de la componente NLoS



$$x = 5 \text{ m}$$



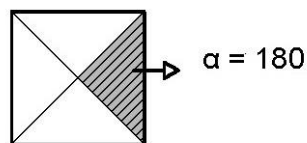
$$x = 10 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.11. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

La componente reflexiva corrige los errores que se producen para un ángulo $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$, ya que como vimos, la componente $NLoS$ no depende del ángulo de incidencia, sino de la frecuencia de modulación (f) y de la frecuencia del transmisor (f_D).

D. $\alpha = 180^\circ$,

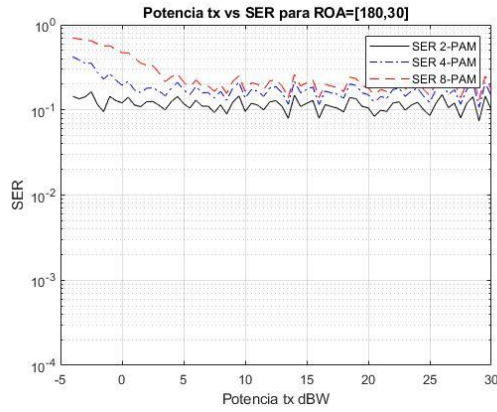
En este apartado, definimos $\alpha = 180^\circ$, de esta manera orientamos el fotodiodo receptor de cara al frente de onda, tal y como sigue a continuación:



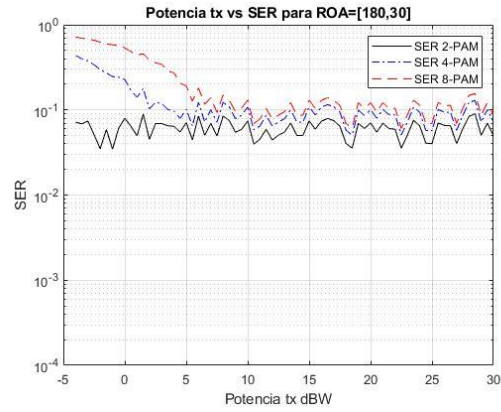
Evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [180^\circ, 60^\circ]$.

d.1. $\theta = 30^\circ$

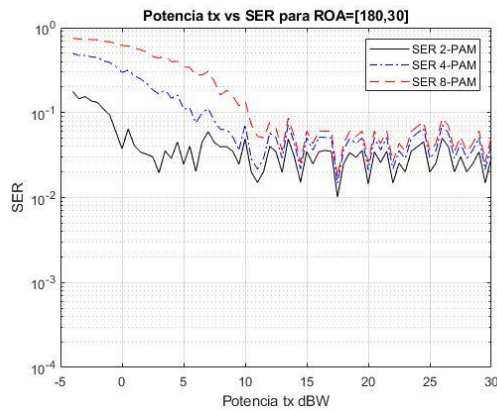
Analicemos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$. La tasa de error SER obtenida se muestra en las gráficas que siguen



$x = 5\text{ m}$



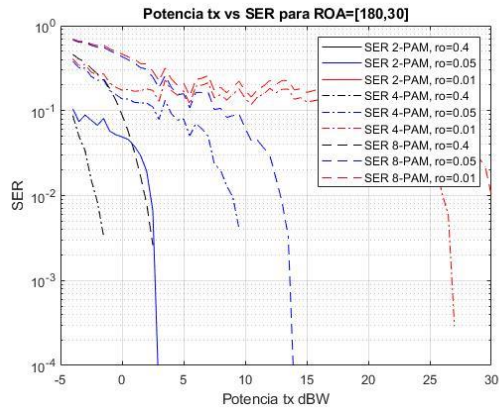
$x = 10\text{ m}$



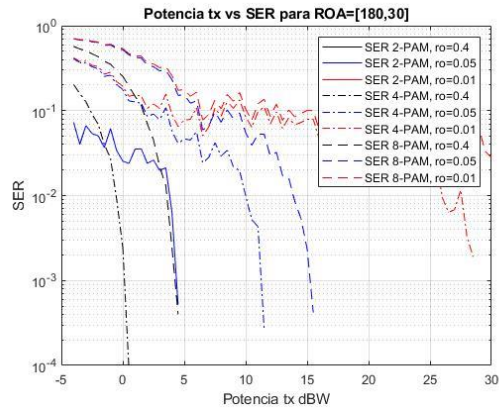
$x = 20\text{ m}$

Gráfica 5. B.12. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

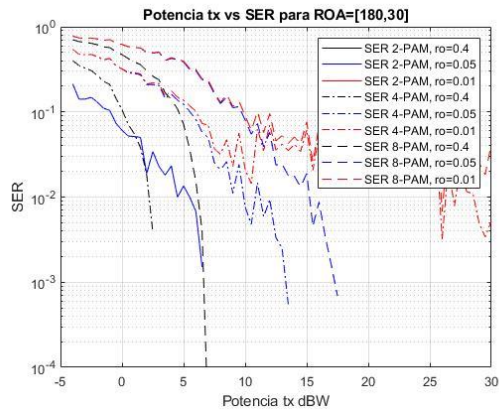
Si sólo tenemos en cuenta la componente de visión directa, en estas condiciones no sería posible establecer una comunicación sin obtener señales degradadas. Sin embargo, anteriormente vimos que, para dicha orientación, si el usuario presente se encuentra en una posición fija la tasa de error obtenida es viable. Esta gran diferencia de tasas de error es consecuencia de la aleatoriedad del usuario receptor. Si tenemos en cuenta la componente reflexiva la tasa de error obtenida es la siguiente



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$



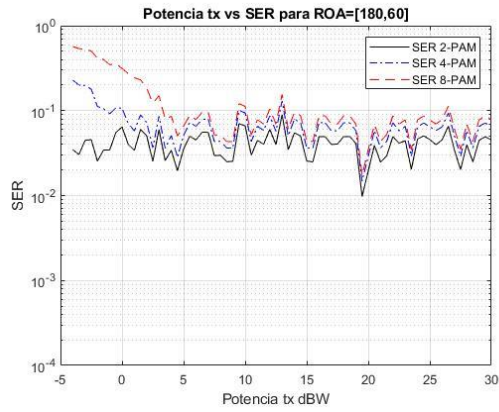
$$x = 20 m$$

Gráfica 5. B.13. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

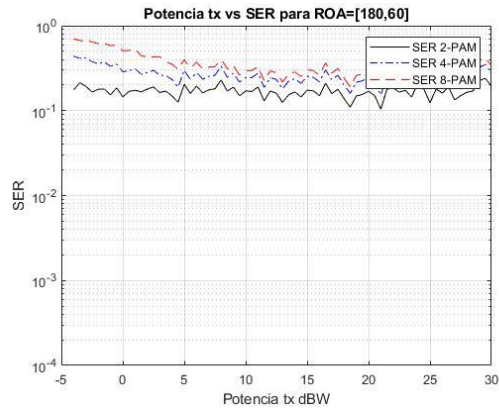
A la vista de los resultados obtenidos, es posible valorar trabajar con materiales que se caractericen por un coeficiente de reflexión de 0.4 o de 0.05, ya que, para ambos coeficientes, la tasa de errores SER resultantes son viables para poder establecer una comunicación.

D.2. $\theta = 60^\circ$

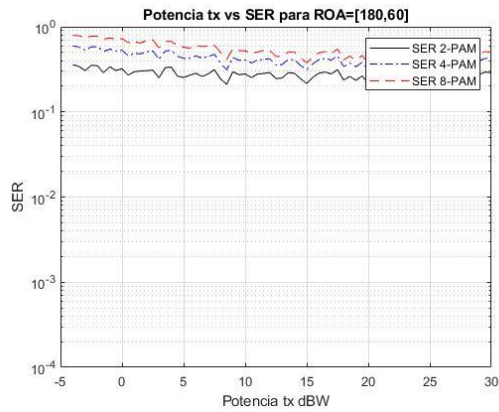
Analicemos a continuación, la tasa SER que resulta tras elevar el fotodiodo un ángulo de $\theta = 60^\circ$.



$x = 5 m$



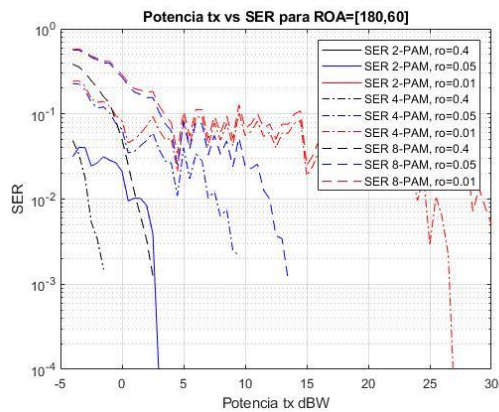
$x = 10 m$



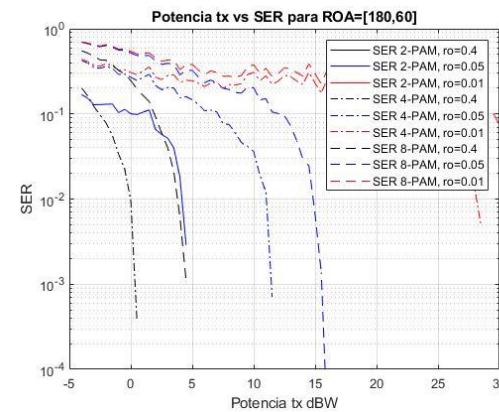
$x = 20 m$

Gráfica 5. B.14. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

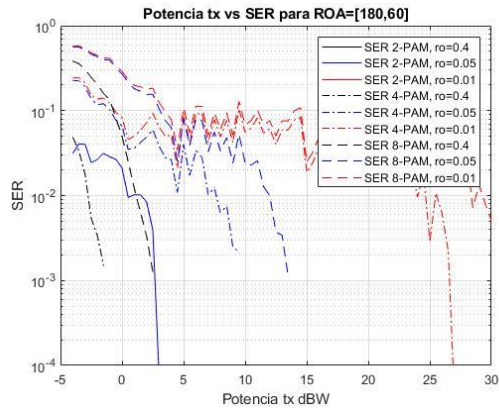
Al igual que para $\theta = 30^\circ$, no es factible establecer una comunicación entre el par transmisor-receptor para estas condiciones. A continuación, verificaremos si es posible disminuir los errores si añadimos al sistema la componente difusa:



$x = 5 m$



$x = 10 m$



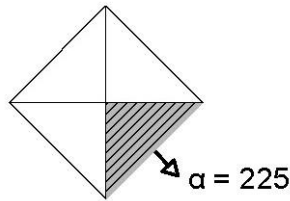
$$x = 20 \text{ m}$$

Grafica5. B.15. $\alpha = 180^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

El coeficiente 0.4 mejora notablemente la calidad de la transmisión, pues la tasa de errores disminuye, llegando incluso a resultar nula si se utiliza una modulación 2 – PAM.

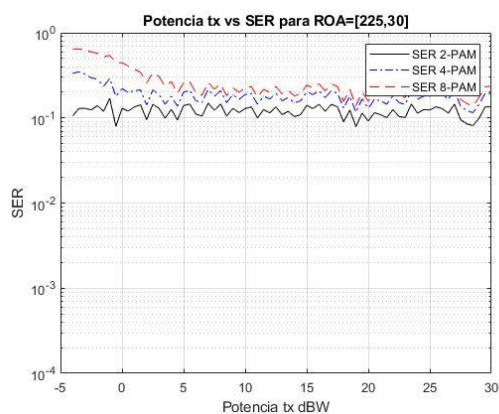
E. $\alpha = 225^\circ$,

Situémonos a continuación en la cara destacada de la pirámide receptora, donde el ángulo ROA se define como $ROA = [225^\circ, \theta]$, donde el ángulo θ toma los siguientes valores $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

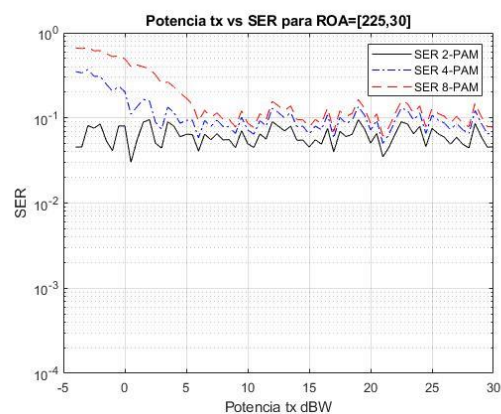


E.1. $\theta = 30^\circ$

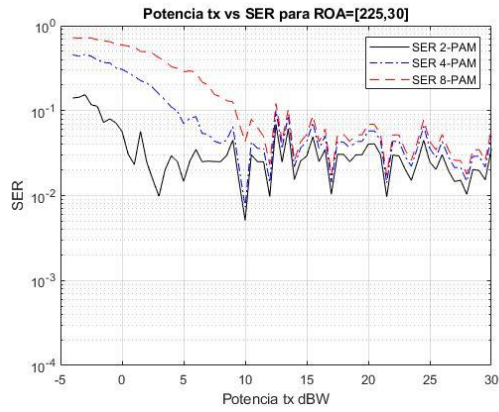
Analizamos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$,



$$x = 5 \text{ m}$$



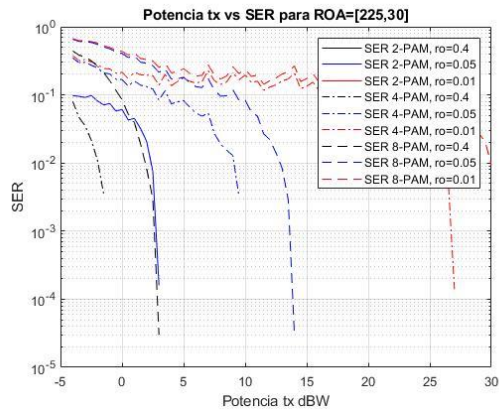
$$x = 10 \text{ m}$$



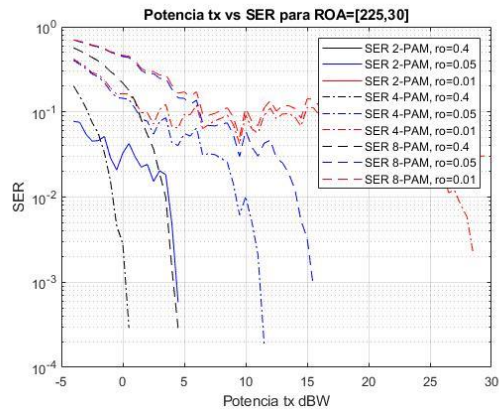
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.16. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

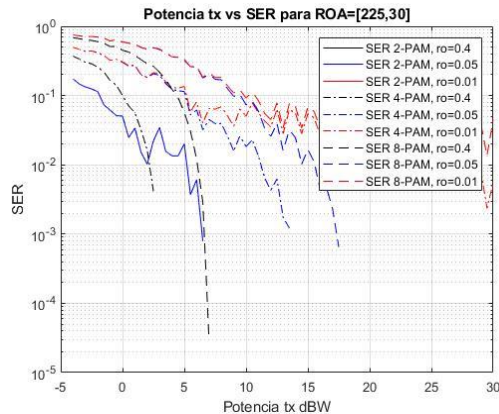
Por simetría, en esta situación, la evolución de la tasa de errores en función del nivel de potencia transmitida es similar a la resultante en la orientación de $ROA = [135^\circ, 30^\circ]$. De igual manera, necesitamos considerar la componente difusa con el objetivo de mitigar los errores de transmisión.



$$x = 5 \text{ m}$$



$$x = 10 \text{ m}$$



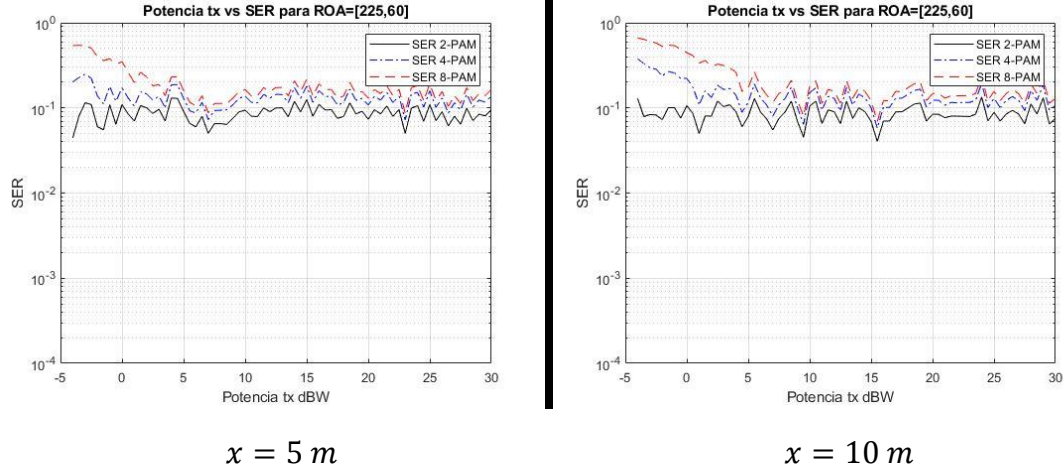
$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica 5. B.17. $\alpha = 225^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS + NLoS

Al igual que en casos anteriores, tras aplicar la componente NLoS, la calidad de la transmisión mejora notablemente. Los mejores resultados de transmisión son los obtenidos para la modulación 2 – PAM.

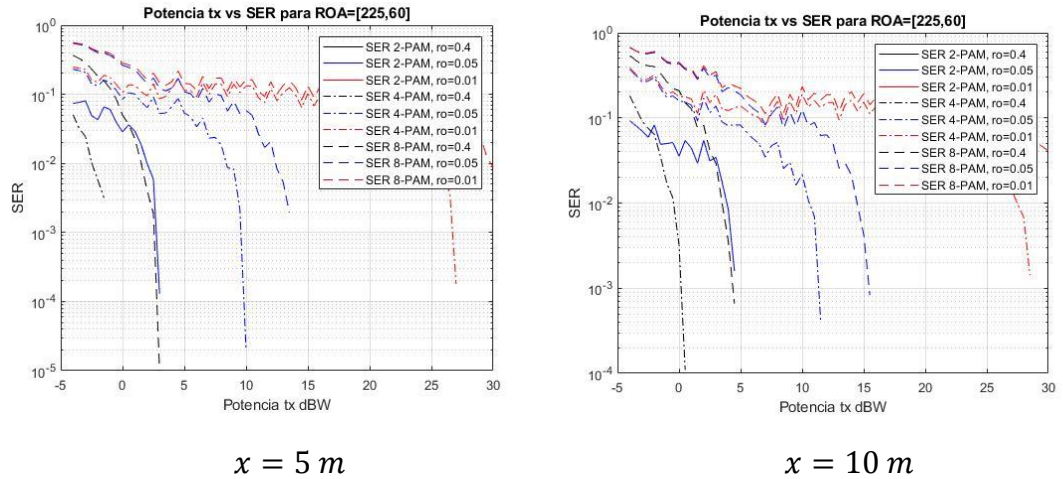
E.2. $\theta = 60^\circ$

Analicemos a continuación, la tasa *SER* que resulta tras elevar el fotodiodo un ángulo de $\theta = 60^\circ$.



Gráfica 5. B.18. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

La tasa resultante sigue la misma línea que en el caso anterior, volvemos a acudir a la componente NLoS con el fin de paliar los errores de transmisión obtenidos.

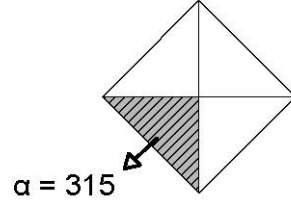


Gráfica 5. B.19. $\alpha = 225^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS + Canal NLoS

Comprobamos de nuevo, que incluso en casos donde el canal correspondiente a la componente de visión directa es nulo, la componente difusa logra disminuir la tasa de error hasta alcanzar tasas del orden de 10^{-2} , donde tras aplicar codificación, se consigue eliminar los errores [42].

F. $\alpha = 315^\circ$,

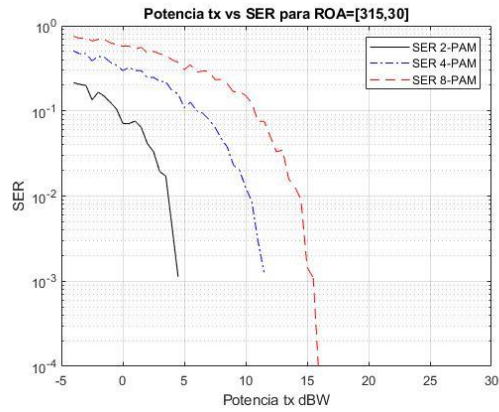
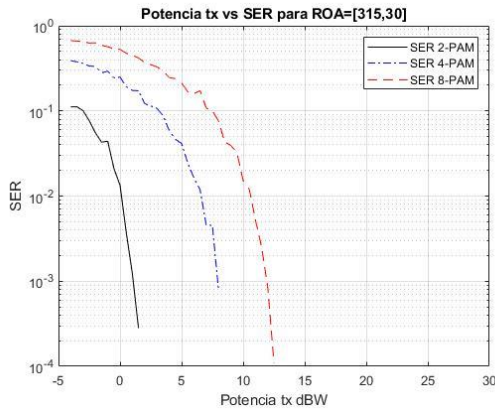
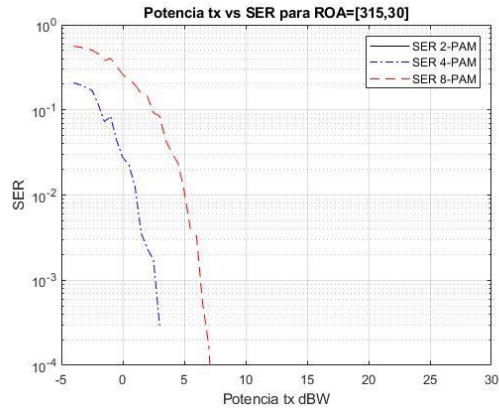
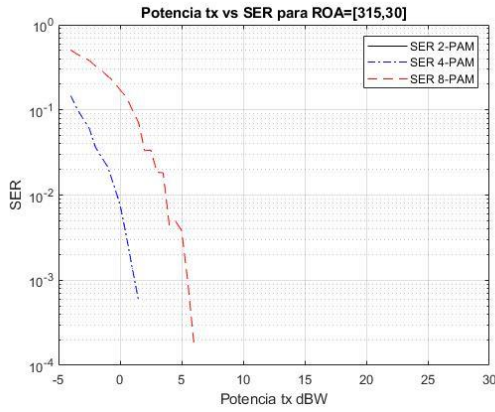
Por último, definimos $\alpha = 315^\circ$, de esta manera orientamos el fotodiodo receptor de cara al frente de onda, tal y como sigue a continuación:



Evaluaremos el sistema de comunicación planteado para los ángulos $ROA = [315^\circ, 30^\circ]$ y $ROA = [315^\circ, 60^\circ]$.

F.1. $\theta = 30^\circ$

Analizamos en primer lugar la inclinación de $\theta = 30^\circ$,

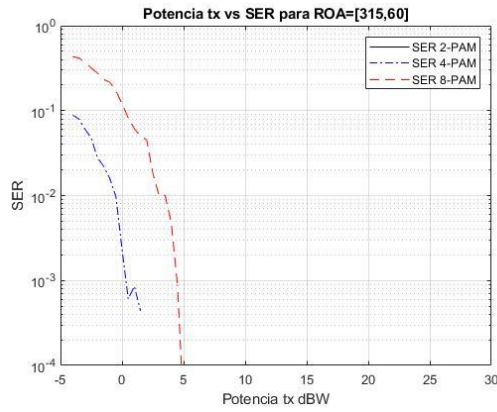


Gráfica 5. B.20. $\alpha = 315^\circ, \theta = 30^\circ$. Canal LoS

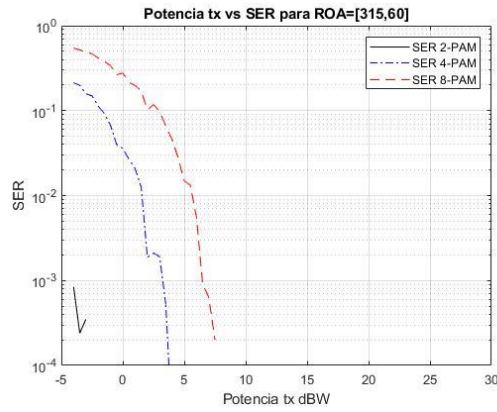
Al igual que en su configuración simétrica ($\alpha = 45^\circ$), la viabilidad del sistema no se ve afectada, considerándose tras los resultados que observamos en las gráficas, un buen sistema de comunicación.

F.2. $\theta = 60^\circ$

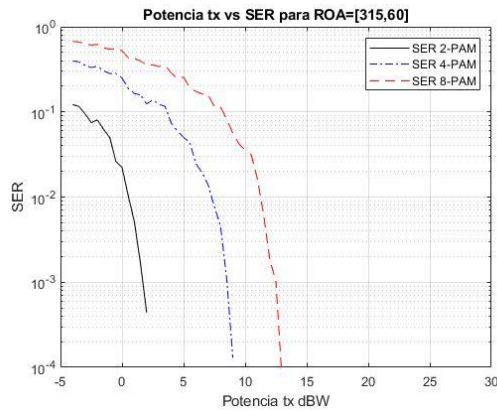
Por último, aumentamos la inclinación del receptor un ángulo de $\theta = 60^\circ$



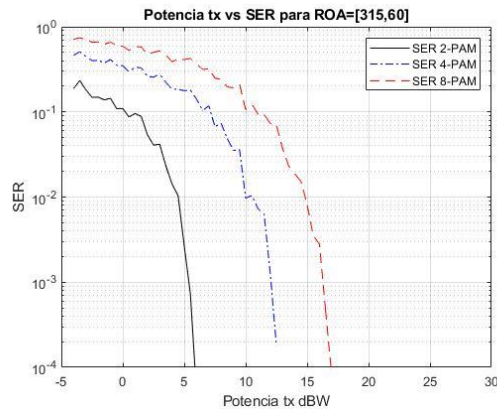
$x = 5 m$



$x = 10 m$



$x = 20 m$



$x = 30 m$

Gráfica 5. B.21. $\alpha = 315^\circ, \theta = 60^\circ$. Canal LoS

En la misma línea con el caso anterior, la tasa de error obtenida sigue siendo viable para esta inclinación.

6. CONCLUSIONES

Hasta ahora el mundo que habitamos ha experimentado tres revoluciones industriales. Hoy en día se prevé que la cuarta revolución industrial, denominada Industria 4.0, ocurra durante la próxima década. Dicho término surgió en Alemania en 2011 para nombrar al conjunto de tecnologías y procesos de producción que diseñarán la industria del futuro.

Sin embargo, debido a la continua demanda de capacidad de transmisión de datos inalámbricos el espectro radioeléctrico resulta insuficiente. Por ese motivo, tanto el estándar 5G como WiFi en 802.11 propone explotar nuevas bandas de frecuencia no reguladas, como la luz visible.

Además, como hemos destacado anteriormente, el sector de la construcción es el menos digitalizado en España, ya que es el que menos invierte en innovación. Por esta razón, surge la necesidad de transformar el sector. La evolución del sector industrial y el de la construcción serán impulsados por un conjunto integrado de avances dando lugar a la Industria 4.0. Se estima que en el 2030 la Industria 4.0 será una realidad irrefutable en todas las fábricas del mundo.

En este proyecto hemos propuesto la tecnología VLC para ofrecer conectividad dentro del marco de la Industria 4.0 debido a su robustez en entornos industriales frente a los sistemas de transmisión basados en radiofrecuencia (RF). Concretamente suponemos que nuestro sistema de comunicación se instalará en un túnel.

Para poder evaluar la viabilidad de esta tecnología en primer lugar hemos caracterizado el canal. Para ello hemos analizado el comportamiento del canal y de la potencia recibida, junto con los ángulos de radiación e incidencia. Transmitiendo a una frecuencia de 100 MHz y, tras variar la orientación del receptor, los resultados muestran la importancia de la orientación a la hora de establecer un enlace fiable, es decir, recibir un canal con las componentes de ángulo de radiación e incidencia lo más cercanas a cero (11)

Por otro lado, hemos disminuido la frecuencia de modulación a 1 MHz , y así analizar viabilidad del modelo de sistema planteado calculando la tasa de error SER, en las mismas condiciones que hemos planteado en el apartado anterior. Para esta situación concluimos lo siguiente:

Si trabajamos a una frecuencia de $f = 1\text{ MHz}$, la componente *LoS* puede suponer un impedimento, ya que no garantizamos un enlace fiable, el cual se compensa con la componente *NLoS*. Sin embargo, para frecuencias de modulación muy altas, es decir $f \gg 1\text{ MHz}$, la componente *NLoS* se atenúa, pudiendo ocasionar atenuaciones considerables.

Por tanto, tras el análisis realizado en el apartado 5, podemos concluir que a 1 MHz , gracias a la aportación de la componente *NLoS*, nuestro sistema responde con robustez frente a los errores. Además, para modular a una frecuencia de 1 MHz , simplemente necesitaríamos luminarias LED estándar. En cambio, si prefiriésemos trabajar a 100 MHz , supondría un aumento de costes, ya que tendríamos que trabajar con luminarias y circuitos más específicos. Es necesario destacar, además, que para el entorno donde queremos instalar nuestro sistema, sólo sería necesario dar cobertura para ofrecer voz, IoT, geolocalizaciones e imágenes a baja/media velocidad donde, para poder ofrecer conectividad a estas tecnologías es suficiente trabajar con 1 MHz .

Además, al modular la señal transmitida a 1 MHz , garantizamos una velocidad de al menos 1 Mbit/sec mediante la modulación $2 - \text{PAM}$. De esta manera, si aplicamos una codificación por turbocódigo con una tasa de $1/2$, es posible minimizar la tasa de error SER, que hemos calculado para un sistema sin codificar, en caso de obtener valores por debajo de 10^{-2} [42]

6.1. Aplicaciones de cara al futuro.

El modelo de sistema que hemos propuesto para el presente proyecto, se podría ampliar con el objetivo de ofrecer transmisión de vídeo HD en tiempo real. Esta aplicación podría aplicarse con el objetivo de brindar mayor seguridad. Por ejemplo, podría ser útil instalarlo en los túneles de la M-30, ofreciendo una monitorización a tiempo real de todo lo que pueda pasar y, en caso de suceder cualquier imprevisto y/o accidente, tendríamos la posibilidad de ser conocedores del problema al instante y actuar con mayor rapidez.

Para ello, sería necesario aplicar luminarias y circuitos con mayor complejidad de la que se ha estudiado para este proyecto. El procedimiento de análisis sería similar al planteado en este proyecto. Primero sería necesario caracterizar el canal, conocer las limitaciones

que pueden encontrarse y plantear posibles mejoras. A su vez, convendría evaluar la viabilidad del sistema planteado, de forma similar a lo planteado en este proyecto.

7. REFERENCIAS

***ESQUEMA:** [#] Iniciales nombre Apellidos autor, *Título del libro en cursiva*, Edición. Lugar de publicación: Editorial, Año de publicación.

- [1] M. Ayyash et al., "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges," in IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
- [2] Curso, "Comunicaciones a través de luz visible en el marco de la quinta generación de comunicaciones celulares". La red Nacional de investigación y educación del Ecuador y la escuela politécnica nacional. <https://www.cedia.edu.ec/es/capacitaciones-cecira/comunicaciones-a-traves-de-luz-visible-en-el-marco-de-la-quinta-generacion-de-comunicaciones-celulares> (acceso: 20 de septiembre de 2018)
- [3] P. Wilke Berenguer et al., "Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 1, pp. 185-193, Jan. 2018.
- [4] M. Jiménez Botías. "La construcción es el sector menos digitalizado de España". El Periódico. <https://www.elperiodico.com/es/economia/20170522/la-construccion-es-el-sector-menos-digitalizado-en-espana-6053314> (acceso: 20 de septiembre de 2018)
- [5] J. A. Plaza López. "La construcción empieza a abrazar las tecnologías del siglo XXI". EL PAÍS Retina. https://retina.elpais.com/retina/2017/07/17/tendencias/1500294559_382065.html (acceso: 20 de septiembre de 2018)
- [6] K. Brekle. "Industria 4.0 o la Internet Industrial de las Cosas (IIoT)". El blog de Ontrack. <https://www.ontrackdatarecovery.es/blog/industria-4-0-o-la-internet-industrial-de-las-cosas-iiot/> (acceso: 22 de septiembre de 2018)
- [7] A. Iglesias Fraga. "Los cinco usos más prometedores del IoT en la industria 4.0". TICbeat. <http://www.ticbeat.com/tecnologias/los-cinco-usos-mas-prometedores-del-iiot-en-la-industria-4-0/> (acceso: 22 de septiembre de 2018)
- [8] A. Iglesias Fraga. "Industria 4.0: del mantenimiento preventivo a la fabricación personalizada". TICbeat. <http://www.ticbeat.com/innovacion/industria-4-0-del-mantenimiento-preventivo-a-la-fabricacion-personalizada/> (acceso: 22 de septiembre de 2018)
- [9] A. Factories. "Cómo la industria 4.0 y el Internet de las Cosas (IoT) están conectados". Advanced Factories. <https://www.advancedfactories.com/la-industria-4-0-internet-las-cosas-iiot-están-conectados/> (acceso: 22 de septiembre 2018)

- [10] A. Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 26-32, December 2013.
- [11] J. J. D. McKendry et al., "Visible-Light Communications Using a CMOS-Controlled Micro-Light Emitting-Diode Array", *J. Lightwave Tech.*, vol. 30, no. 1, pp. 61–67, Jan. 2012.
- [12] J. J. D. McKendry et al., "High-Speed Visible Light Communications Using Individual Pixels in a Micro Light-Emitting Diode Array", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 22, no. 18, pp. 1346–48, 2010.
- [13] N. Serafimovski et al., "Light Communications for Wireless Local Area Networking", *IEEE Future Networks Enabling 5G and Beyond*, Vol. 2, No. 2, May 2018. [En línea] Disponible en: <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/may-2018/light-communications-for-wireless-local-area-networking> Acceso: 15 de octubre 2018
- [14] J. LLori, "Normas de LiFi", Li-Fi La nueva Tecnología. <http://innovacionli-fi.blogspot.com/p/normas-del-lifi.html> (acceso: 15 de octubre 2018)
- [15] C. Valero, "Bandas del 5G, 4G, 3G y 2G en España: frecuencias telefonía móvil de cada operador", ADSLZONE. <https://www.adslzone.net/bandas-5G-4G-3G-2G-frecuencias-telefonía-movil> (acceso: 16 de octubre 2018)
- [16] J.A. Barros, "Diferencia entre 5G y 4G, cobertura, móviles y llegada a España", CompartirWIFI. <http://www.compartirwifi.com/blog/diferencia-entre-5g-y-4g-cobertura-moviles-y-llegada-a-espana/> (acceso: 16 de octubre 2018)
- [17] Agencia AFP, "5G: Cuatro cosas que debes saber sobre la nueva red móvil", 24 Horas. <https://www.24horas.cl/tendencias/ciencia-tecnologia/5g-cuatro-cosas-que-debes-saber-sobre-la-nueva-red-movil-2653390> (acceso: 16 de octubre 2018)
- [18] M. Martínez, J. Valdés and V. Quintero, "Interferencia co-canal en redes heterogéneas". *INGE CUC*, vol. 9, no. 1, pp. 143-162, Jun, 2013.
- [19] Anónimo. "Espectro Radioeléctrico". Esopo. <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/espectro-radioelectrico> (acceso: 18 de octubre 2018)
- [20] J. Leyva Bravo, D. Beltran Casanova. "La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60 GHz", *Universidad y Sociedad*, vol. 8, no. 2, pp. 89-96, agosto 2016. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000200011

- [21] G. Agredo-Méndez, P. E. Jojoa-Gómez, V. Almenar-Terré. “Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica”. *Entramado* vol. 11, no. 2, pp. 250-261, Julio-diciembre, 2015. [En línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265443638019>. Acceso: 26 de octubre de 2018
- [22] F. M. Maciel, J. Sánchez, L. Soriano, F. R. C. Soria and J. Flores, “User Scheduling Algorithms in Multiuser Massive MIMO Systems Towards 5G”, *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 13, no. 12, diciembre 2015. (acceso: 26 de octubre de 2018)
- [23] C. Sánchez. “El paradójico negocio de llevar internet a los lugares donde no sale rentable”. *El Confidencial*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-01-07/el-paradojico-negocio-de-llevar-internet-a-los-lugares-donde-no-sale-rentable_1130923/ (acceso: 27 de octubre de 2018)
- [24] J. Batlle, J. Forcadell. “Smart territory transformation – Entornos rurales e insulares inteligentes. Esmartcity.es <https://www.esmartcity.es/comunicaciones/smart-territory-transformation-entornos-rurales-insulares-inteligentes> (acceso: 27 de octubre de 2018)
- [25] Anónimo. “El proyecto Territorio Rural Inteligente lleva a la población leonesa de Molinaseca una red de sensores”. <https://www.esmartcity.es/2018/07/18/proyecto-territorio-rural-inteligente-lleva-poblacion-leonesa-molinaseca-red-sensores> (acceso: 27 de octubre de 2018)
- [26] I. del Castillo. “La consecuencia de la latencia (los clientes cautivos del 5G)”. *Tecnoestrategias, Expansión blogs*. <http://www.expansion.com/blogs/tecnoestrategias/2018/02/03/la-consecuencia-de-la-latencia-los.html> (acceso: 27 de octubre de 2018)
- [27] H. Haas, S. Dimitrov, “Principles of LED Light Communications Towards Networked Li-Fi”, 1ª. Reino Unido: Cambridge University Press, 2015.
- [28] Anónimo. “OOK vs FSK vs ASK. Difference between OOK, FSK, ASK modulation”. *RF Wireless World*. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/OOK-vs-FSK-vs-ASK.html> (acceso: 29 de octubre de 2018)
- [29] William. “What is ASK and OOK Modulation”. *Solidremote blog*. <https://www.solidremote.com/blog/what-is-ask-and-ook-modulation/> (acceso: 29 de octubre 2018)
- [30] J. Abellán. “Modulación por ancho de pulso (PWM)”. *El rincón de Maxwell*. <https://elrincondemaxwell.wordpress.com/2016/02/21/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/> (acceso: 29 de octubre 2018)

- [31] B. Genovés Guzmán, V.P. Gil Jiménez, “Señales DCO-OFDM eficientes para VLC utilizando Redes Neuronales adaptativas Difusas (ANFIS)”, presentada en XXIX Simposium nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Valencia, 3 – 5 septiembre de 2014. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/21526>
- [32] Anónimo. “Flicker fusión threshold”. Wikipedia.org. https://en.wikipedia.org/wiki/Flicker_fusion_threshold (aceso: 10 de noviembre de 2018)
- [33] B. Lehman, A. J. Wilkins, "Designing to mitigate the effects of flicker in LED lighting reducing risks to health and safety", IEEE Power Electron. Mag., vol. 1, no. 3, pp. 18-26, Sep. 2014.
- [34] Ericsson. “Welcome to the smartfactory”. Ericsson. <https://www.ericsson.com/en/cases/2017/smartfactory> (acceso: 16 de noviembre de 2018)
- [35] R. Sabella. “Cyber physical systems for Industry 4.0”. Ericsson. <https://www.ericsson.com/research-blog/cyber-physical-systems-industry/> (acceso: 16 de noviembre de 2018)
- [36] S. Rajagopal, “TG7 Technical Considerations Document (TCD)”, IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks, Informe Técnico, 09-0564-00-0007, 2009
- [37] T. Gyu Kang, J.W. Walewski, K. Ikawa, R. Roberts, L. Sang Kyu, L. Taylor, T. Matsumura, J.C. Chau. “IEEE 802.15.7 VLC Regulation: Removing 5.7 and Annex I rewriting”, IEEE 802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, Informe técnico, 10-0527-01-0007, 2010
- [38] M. Uysal, F. Miramirkhani, T. Baykas, K. Qaraque, “IEEE 802.11bb Reference Channel Models for Indoor Enviroments”, 802.11 WLANs WG Group Information, Informe técnico, 18/1582r2, 2018, Disponible en: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/18/11-18-1582-02-00bb-ieee-802-11bb-reference-channel-models-for-indoor-environments.pdf>
- [39] Máximo Morales-Céspedes, Harald Haas, Ana García Armada, “On the Optimality of Precoding Schemes for Visible Light Communications”. [Enviado a IEEE Transactions on Communications]
- [40] Concrete Society. “Reflectance of concrete”. The Concrete Society. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=916> (acceso: 10 de febrero 2019)
- [41] S. Hinton, “How the fourth industrial revolution is impacting the future of work”. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/theyec/2018/10/19/how-the-fourth->

[industrial-revolution-is-impacting-the-future-of-work/#7391487865a7](#) (acceso: 10 de febrero 2019)

- [42] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes," in IEEE Transactions on Communications, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.

ANEXO I – PRESUPUESTO

En este apartado evaluaremos económicamente el presente Proyecto. Para ello adjuntamos el siguiente presupuesto:

COSTES DE PERSONAL

Puesto	Coste/h	Total horas	Coste Total
Tutor	30 €/h	60 h	1.800 €
Alumno	10 €/h	500 h	5.000 €
TOTAL			6.800 €

Tabla I. Costes de personal

COSTES DE MATERIAL

Material	Coste
Ordenador Portátil	900 €
Licencia Microsoft Office	99 €
Licencia Matlab	69 €
Acceso a artículos IEEE	13,24 €/artículos*
TOTAL	1.081,24 €

Tabla II. Costes de material

*Universidad suscrita a IEEE.

COSTES GENERALES

Material	Coste
Luz	50 €
Conexión Internet	25 €
TOTAL	75 €

Tabla III. Costes generales

COSTES TOTAL

Tipo de coste	Importe
Coste de personal	6.800 €
Coste de material	1.081,24 €
Costes Generales	75 €
TOTAL	7.956,24 €

Tabla IV. Presupuesto total

ANEXO II – ABSTRACT

1. Introduction.

1.1. State of communications

Currently, the number of mobile devices connected to Internet and the rise of the Internet of Things (IoT), are driving a continuous demand for wireless data transmission capacity. This demand involves an evolution of the communication networks and infrastructures with the aim of meeting the needs of future applications [1].

Due to this growth, the available radio spectrum below 10 GHz becomes scarce. The 5G standard proposes to develop new frequency bands. Therefore, data transmission considering unregulated bands, such as visible light, has been proposed during the last years.

1.2. Industry 4.0 and construction

So far, the world we inhabit has experienced three industrial revolutions. Nowadays, it is expected that the fourth industrial revolution, called Industry 4.0., will take place during the next decade. This term emerged in Germany in 2011 to name the set of technologies and production processes that will design the industry of the future [3].

However, it is necessary to implement important changes. According to the next news "*Construction is the least digitalized sector in Spain*", published in *El Periódico*, "*The construction sector is the one that invests the least in innovations*" [4]. In addition, in another news "*Construction begins to embrace the technologies of the 21st century*", published in *El País*, it is corroborated that "robotics, digital manufacturing or 3D printing are slowly opening up in a sector that seems at odds with innovations" [5]. The transformation of the sector will be driven by a set of advances leading to the fourth industrial revolution, Industry 4.0., decreasing the cost and consumption of resources [5]

1.3. Internet of Things at Industry 4.0

The *Internet of Things* has become an essential component in reports related to information technologies. *Cisco Systems* stipulates that by 2020, there will be around 50 billion devices connected to the Internet. This rapid growth offers immense opportunities for the sector [6]. According to the experts, the incorporation of IoT solutions "meet a twofold objective, making production more efficient and competitive and, in parallel, that workers acquire higher levels of security" [7].

A recent study indicates that 74% of the world leaders belonging to this sector recognize that their plans for expansion and development are based on the concept of Industry 4.0. In 2030, it is estimated that Industry 4.0 will be an irrefutable reality in all the factories of the world, giving as completed the period of digital revolution [8]. Thus, Industry 4.0 is established as the new manufacturing standard of the future [9].

1.4. Traditionally communications based on radiofrequency

As mentioned above, Industry 4.0 is positioned as the pillar of intelligent technology. Faced to radio frequency technology, this intelligence is considered as a possible solution

to the problems that may arise in a radio communication system, specifically in an industrial environment.

1.4.1. Bandwidth

1.4.1. A. Cellular Communications

The radio spectrum is the physical environment through which electromagnetic waves (OEM), that make telecommunications possible, are transmitted [19]. Formally and according to ITU, the frequency range comprising the radio spectrum is between 0 Hz - 3000 GHz. In practice, due to its limitations, it varies between the frequencies of 30 KHz - 300 GHz, where each one will be assigned to a different technology.

As for the 4G-LTE standards and 3G, one of the main problems consists that does not have enough capacity to provide all the necessary data to an increasing number of mobile devices. This is why the 5G standard is proposed. It will open doors to new uses such as the use of wireless sensors, car-to-car communication, etc. [16].

1.4.1. B. Millimeter Waves Communications

The 5G standard works with extremely high frequencies, which are called millimeter waves, within the range of 30 GHz - 300 GHz. Most of these waves only work if there exists a direct line of sight between the transmitter and the receiver [16]. Some of these frequencies are attenuated by humidity, rain and other objects. For this reason, with this technology it is not possible to establish long connection links [16].

1.4.2. Lack of connectivity in hostile or rural environments

The European Union has set a goal to ensure that all European citizens enjoy broadband coverage of more than 30 Mbps by 2020 [23]. However, in rural areas of the Spanish territory, it is not viable thinking of solutions based on wired technologies because of the topology of the rural environment in Spain.

Currently, companies do not invest in providing these territories with technologies such as optical fiber. Because of this, wireless technologies are playing an important role, since the infrastructure that is deployed in rural areas will serve as a basis for the future implementation of 5G technology.

1.5. Visible Light Communications (VLC)

1.5.1. Characteristics

The main property of VLC Technology is the capacity of illuminating at the same time that data transmission is being performed. The source of transmission are luminaires based on LED technology, offering the possibility of modulating its amplitude without damaging its main function, lighting, at no time [10].

Typically, the transmission rate of the VLC link is limited by the modulation bandwidth of the LEDs. As for the VLC channel, it is not affected by the Doppler dispersion. Thanks to this feature, sophisticated algorithms are not required to track the channel, since it is invariant over time. Finally, another characteristic of VLC is the low cost for its installation and operability. In addition, a working group of the IEEE is trying to normalize VLC for its application in Industry 4.0.

1.5.2. Advantages VLC vs. RF

	RF	VLC
DATA RATE	High	Very High
FREQUENCY RANGE	30 KHz – 300 GHz	400 THz – 800 THz
REGULATION	Yes	No
RADIO COVERAGE	Order of Km	Order of m
COST	high	Low
NOISE SOURCE	Adjacent frequencies	Other light sources
WALL PENETRATION	Yes	No
ATMOSPHERIC LOSSES	No	Yes
SECURITY	Medium-Low	High

Tabla R.1. Advantages VLC vs. RF

1.5.3. Regulatory environment

The main objective for the large-scale implementation of this technology is the availability of standards. In IEEE 802.11, they are currently working on standardizing VLC as another physical layer within the group of wireless local area networks, better known as WiFi. In the latest update of the IEEE 802.15 project for wireless personal area networks, a new physical layer (PHY) and modifications to the IEEE 802.11 MAC standard, that enable the operation of light wireless communications, are specified [38].

1.6. Application in Industry 4.0

The use of Optical Wireless Communications (OWC) has been studied for implementing it in industrial environments. In this project, we consider OWC to offer connectivity in a tunnel under construction. This application is interesting because it provides greater security. In addition, thanks to the availability of unregulated, unused, and interference-free optical frequencies, there is the possibility of rapid extension of industrial wired networks. For the design of the OWC link in industrial applications, standard LED luminaires are used since a low data rate is required.

1.7. Objectives of the project

- Characterize the transmission of data through a VLC system in industrial environments, specifically in tunnels.
- Propose a realistic system model for confined scenarios such as tunnels.
- Ensuring a transmission speed of at least 1 Mbit/sec.
- Evaluating the quality of service (QoS) system analyzing Symbol Error Rate (SER).

2. The state of art

In this section, we will detail the total of the references on which we have based our project's research the investigation of our project.

3. Optical system

3.1. System Model

Given the multiple advantages of the VLC, it is considered a key factor for the evolution of wireless communications. In order to offer an appropriate lighting, several LED luminaires are usually installed, configuring the downlink as a system of multiple transmitters. Interference management is complicated for these systems since coordination between receivers is not possible [39].

In VLC networks, intensity modulation (IM) and direct detection (DD) are used incoherently [39]. Due to the use of IM / DD, the signal to be transmitted must have a non-negative real and unipolar value. This condition is satisfied by adding a continuous polarization current. In this project, we rely on the system model proposed in the work [39] where an internal scenario is considered for installing the VLC system. However, we do not apply channel coding, e.g., turbo-codes, to our system.

3.1.1. Available modulations

3.1.1. A. Mono-carrier modulations available

One of the most suitable candidates for transmitting data in VLC systems is the pulse modulation of a single carrier. To transmit information, binary On-Off Keying (OOK) modulation can be used. Alternatively, the information can be encoded with the modulation by the pulse position (PPM), which is generated by pulse width modulation (PWM), or by pulse amplitude modulation (PAM).

3.1.1. B. Multi-carrier modulations available

In multi-carrier modulations, the information is encoded into sub-carriers with complex values using the M-QAM modulation scheme. In both the transmitter and the receiver, the IFFT and FFT transforms are used as multiplexing and de-multiplexing techniques. By imposing the Hermitian symmetry of the OFDM sub-carriers, a real signal is obtained in the time domain. After obtaining that real signal, two types of OFDM, DCO-OFDM, DC-biased Optical OFDM and ACO-OFDM, Asymmetrically Clipped OFDM modulations are proposed.

3.1.1. C. Pulse Amplitude Modulation

We propose the application of PAM modulation to our system model since it is the simplest modulation of all, with respect to the rest of digital modulations and, in addition, it is the least sensitive modulation to rebounds, thus diminishing interferences.

In turn, we highlight the use of this modulation for its spectral efficiency. For example, if $M = 2, 4$ the spectral efficiency we would have would be the following one:

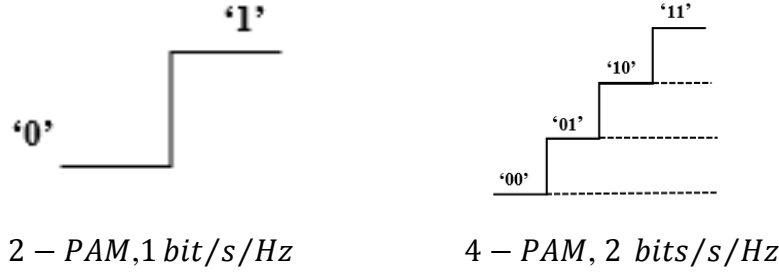


Figura R.1. As modulation increases, the probability of error increases.

3.2. Transmitter with M-PAM

We apply the transmitter configuration described in article [39]. We consider that K users are present in the system, the data transmitted to these K users are given by: $s = [s^{[1]}, \dots, s^{[k]}]^T$. The signal transmitted by the L LEDs is given by: $x = s + I_{DC}$. The transmitted signal must be within the limits of the output power of the LEDs, complying with [46] $0 \leq x_l + p_l \leq P_{led}$. Where $x_l = \sum_{k=1}^K s^{[k]}$ and p_l corresponds to the power of the DC-bias. Since $s_l \in [-1, 1]$ by definition, the power of each transmitter is within the following limits: $0 \leq -\sum_{k=1}^K s^{[k]} + p_l \leq P_{led}$

3.3. Optical channel

This project considers a VLC system during the construction of a tunnel. We base our study on the channel proposed in the paper [39]. In the frequency domain, the channel between the transmitter l and the photodiode n of user K , at frequency f is defined as: $h_l^{[k,n]}(f) = (h_{LOS,l}^{[k,n]} + h_{NLOS}(f))h_{F-E}(f)$.

The Line-of-Sight (LoS) component is defined as the DC gain given by [46]:

$$h_{LOS,l}^{[k,n]} = \begin{cases} \frac{\gamma A(m+1)}{2\pi d_{kl}^2} T(\phi_l^{[k,n]}) \cos^m(\phi_l^{[k]}) \cos^r(\phi_l^{[k,n]}) & \text{si } 0 \leq \phi_l^{[k,n]} \leq \Psi_c \\ 0 & \text{si } \phi_l^{[k,n]} \geq \Psi_c \end{cases}$$

The Non-LoS (NLoS) component in the frequency domain is defined as [39]: $h_{NLOS}(f) = \eta_{NLOS} \frac{e^{-j2\pi f \Delta T}}{1 + j \frac{f}{f_D}}$. Finally, the frequency response of the front-end is modelled as follows

$$[39]: h_{F-E}(f) = e^{-\frac{f}{1.44fm}}$$

3.4. Receptor

With the aim of providing diversity to the system, we consider receivers composed of multi-diodes where each photodiode is characterized by a reception orientation angle (ROA). This receiver is discussed in [39]. Each N photodiode will be determined by its azimuthal angle, denoted as $\theta^{[k,n]}$, and its polar angle $\alpha^{[k,n]}$. Thus, the orientation vector of photodiode N is the following [46]: $\hat{n}_p^{[k,n]} = [\sin(\theta^{[k,n]}) \cos(\alpha^{[k,n]}), \sin(\theta^{[k,n]}) \sin(\alpha^{[k,n]}), \cos(\theta^{[k,n]})]$. In relation to the radiation vector, assuming that the LEDs point to the ground, it is defined as: $\hat{n}_l = [0, 0, -1]$.

4. Characterization of the optical channel in tunnels construction

Notice that our VLC system is deployed in a tunnel. Moreover, taking into account that it is still in the construction phase, where there is no "technology" other than light wiring. We propose a rapid solution of communications, based on a network of luminaires.

4.1. Channel characterization

4.1.1. LoS channel characterization

The LoS channel is the representation of the direct view component, also known as *Line of Sight* (LoS). This component defines the channel between transmitter and receiver, separated at a d_{kl} distance. For our project, that distance varies from 0 m to 20 m.

4.1.1. A. LoS channel depending on the distance

We want to know the response of the LoS component through the tunnel. For that, we analyze its response and the power received for each of the faces that make up the proposed receiver. We will define the orientation of each photodiode as shown in the following image:

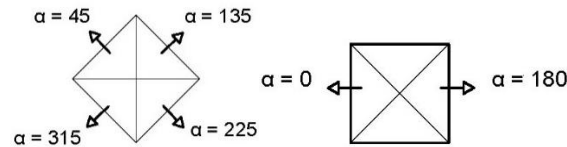
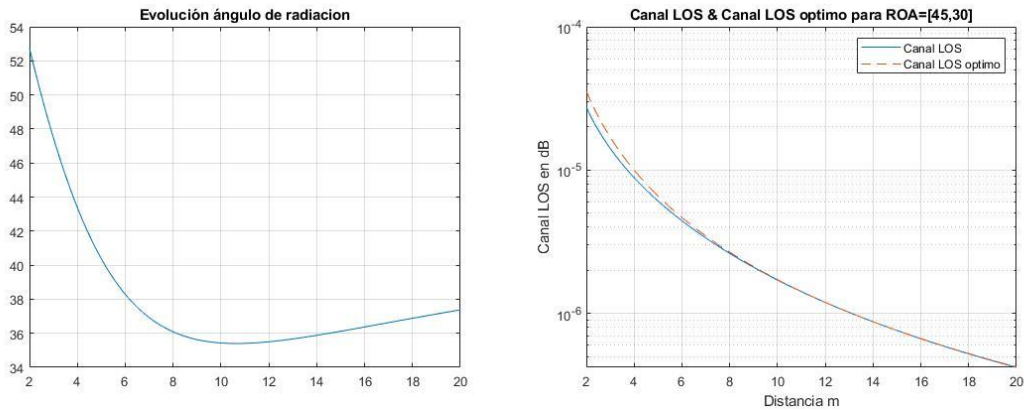
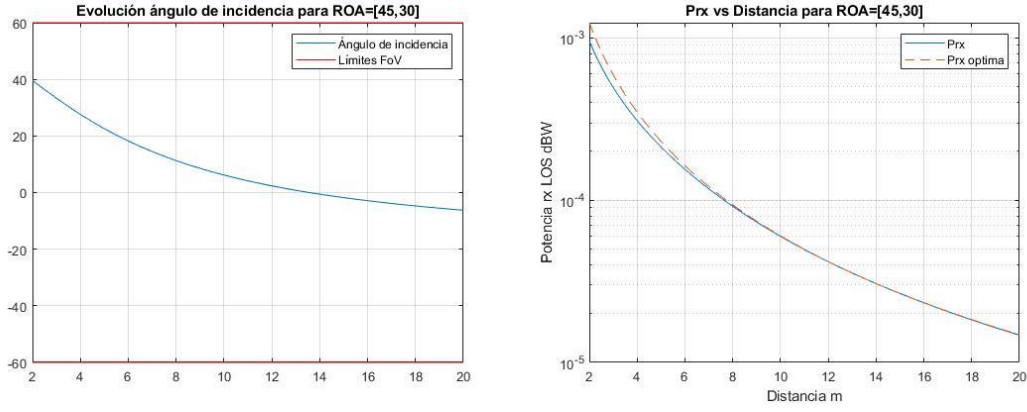


Figura R.2. Receiver Orientations

The inclination of each photodiode is determined by $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$. We analyze each inclination for each corresponding orientation, thus determining the ROA angle. An example of the analysis is carried out in the following plots:

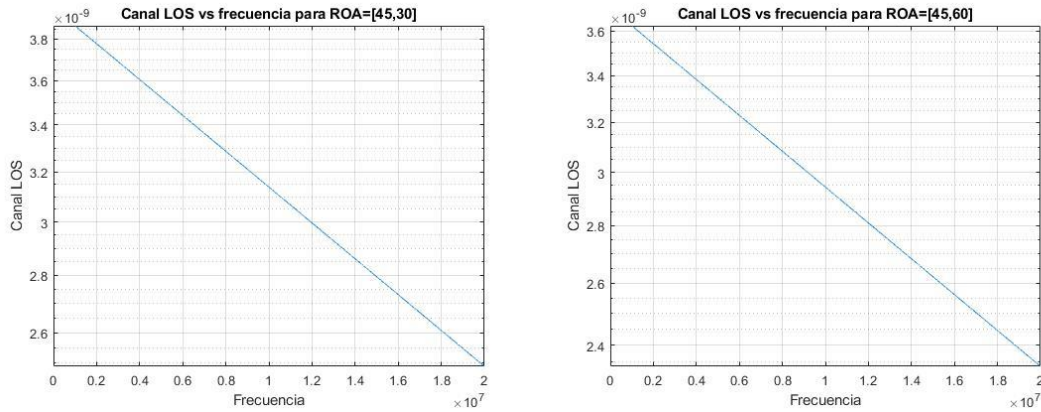




Gráfica R.1. LoS channel depending on the distance. $ROA = [45^\circ, 30^\circ]$

4.1.1. B LoS channel depending on the frequency

We model the frequency response of the *Line-of-Sight* component of the channel using the $h_{F-E}(f)$ frequency response. The analysis carried out in this section follows the same line as the previous one, for each orientation of the ROA angle we obtain the following graphs:



Gráfica R.2. LoS channel depending on the frequency. $ROA = [45^\circ, \theta]$.
Where $\theta \in \{30^\circ, 60^\circ\}$

4.1.2. NLoS channel characterization

The channel resulting from the reflection produced in the walls, also known as Non Line-of-Sight (NLoS), is characterized by the semi-angle transmitter $\phi_{1/2} = 70^\circ$ and the distance travelled by the NLoS beam, which is divided in two paths, as shown in the following figure.

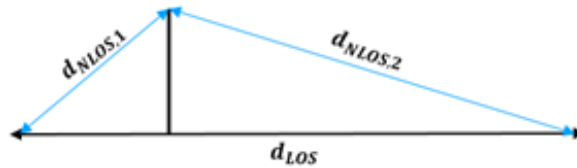


Figura R.3. NLoS's Path

4.1.2. A. NLoS channel characterization depending on the frequency

It is expected that, for the orientations considered in section 4.1.1 B, the frequency response of the NLoS component, as a function of frequency, behaves in a similar way as is shown in the following figure. Due to the negative fall of the component, this model restricts the available bandwidth considerably.

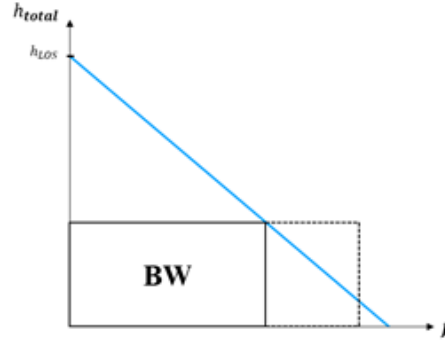


Figura R.4. Frequency response of the NLoS component

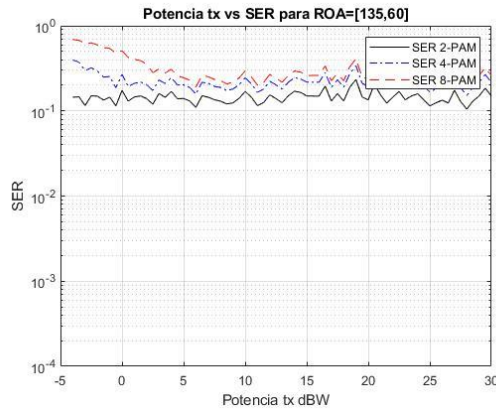
5. Simulations

In this section, we perform simulations to evaluate the SER, Symbol Error Rate. These simulations are key to evaluating data transmission systems in point-to-point systems. This evaluation takes into account the contribution of the transmitter, receiver and the mean through which light propagates.

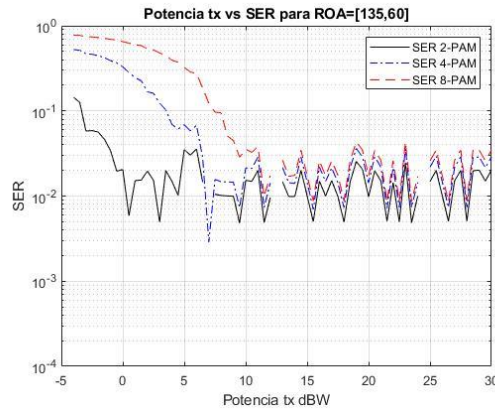
We distinguish two situations of study given that the tunnel is in full construction. We consider, on the one hand, a fixed user taking into account that the wave front can be fixed, and, on the other hand, we evaluate the channel for a random user, since the wave front can advance as the tunnel is built

5.A. Fixed user

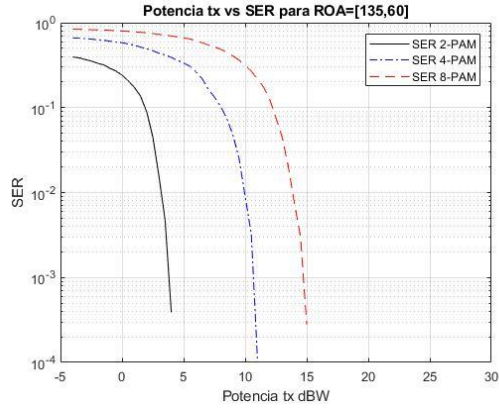
We carry out an analysis following the line of the previous section, we evaluate the system model proposed for each of the photodiodes that form our receptor pyramid. We show an example below: For an orientation angle $ROA = [135^\circ, 60^\circ]$, the error rate obtained, considering only the LoS component, is this one:



$x = 5 \text{ m}$



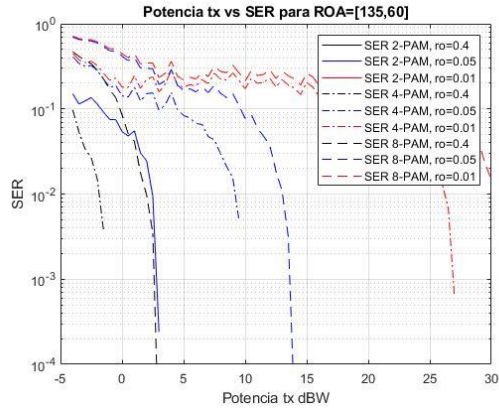
$x = 10 \text{ m}$



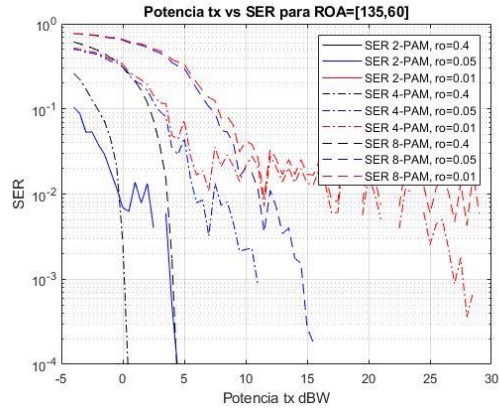
$$x = 20m$$

Gráfica R.3. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. LoS component

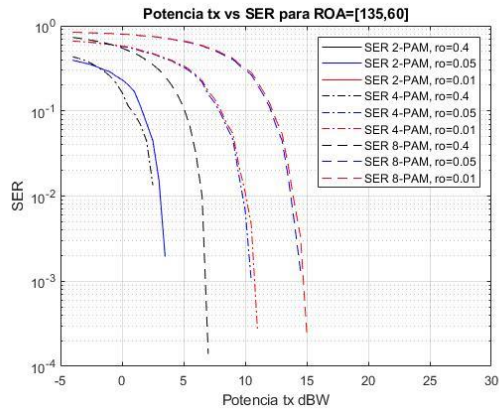
As we have a high error rate, we apply the NLoS component to the evaluation of the channel. In this way, we obtain better results:



$$x = 5 m$$



$$x = 10 m$$

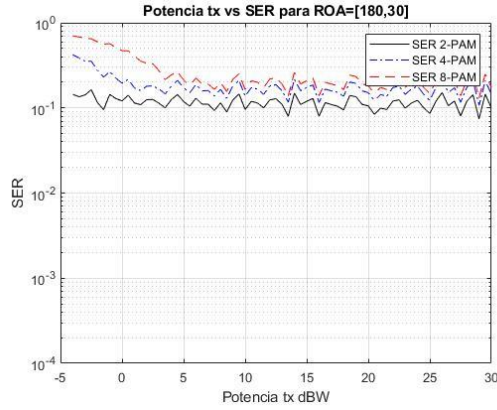


$$x = 20m$$

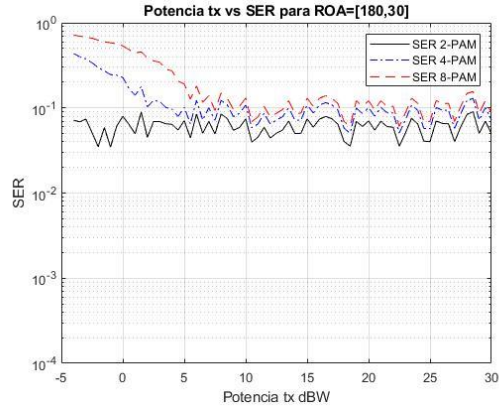
Gráfica R.4. $\alpha = 135^\circ, \theta = 60^\circ$. LoS and NLoS components

5.B. Random user

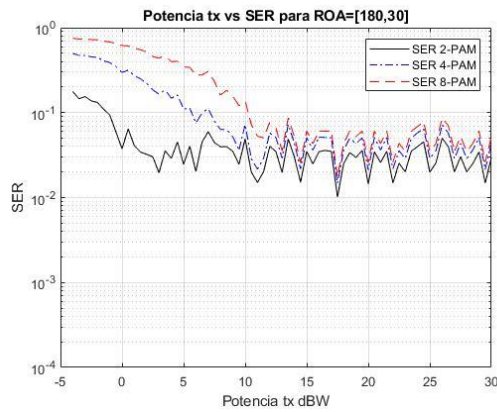
In this section, we carry out the same analysis as in the previous section, but with a random user. In this case, we use as an example the error rate obtained with the angle $ROA = [180^\circ, 30^\circ]$:



$x = 5 m$



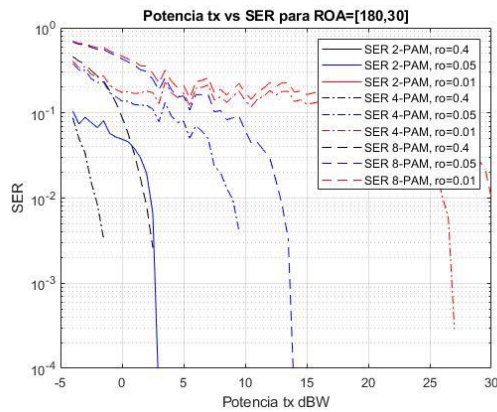
$x = 10 m$



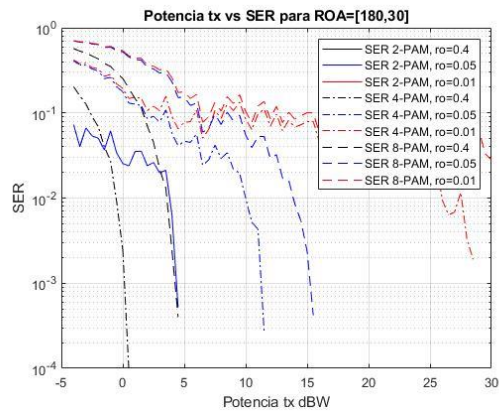
$x = 20 m$

Gráfica R.5. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. LoS component

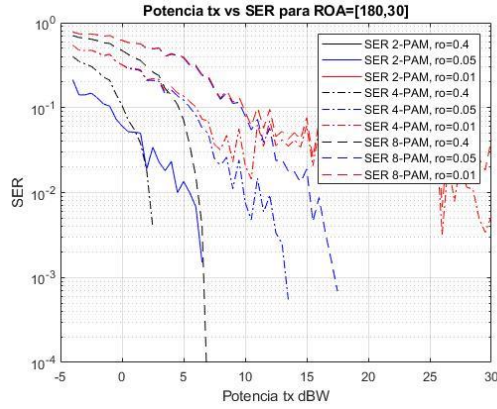
As we have obtained many errors, we add to the evaluation the contribution of the NLoS component:



$x = 5 m$



$x = 10 m$



$$x = 20 \text{ m}$$

Gráfica R.6. $\alpha = 180^\circ, \theta = 30^\circ$. LoS and NLoS components

6. CONCLUSIONS

In this project, we have proposed VLC technology to offer connectivity within the framework of Industry 4.0., specifically during the construction of a confined structure such as a tunnel. We evaluated the viability of the proposed system model characterizing the channel, depending on distance and frequency, while highlighting the importance of the ROA angle to increase transmission possibilities. Furthermore, we have proposed a pyramidal receiver, where each side corresponds to a photodiode.

The results show the importance of the ROA angle in order to establish a reliable link. In relation to the Symbol Error Rate, for frequencies of 1 MHz, the LoS component can be an impediment, as it does not guarantee a reliable link, which is compensated by the contribution of the NLoS component. However, for high modulation frequencies, the NLoS component is attenuated, which can cause considerable attenuations. Furthermore, by transmitting at 1 MHz, we guarantee a speed of at least 1 Mbit/s for satisfactory values of SER.